



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

MEJORA INTEGRAL DE LA MINERÍA DEL ORO A PEQUEÑA ESCALA, BOLIVIA

Autor: Anna Freixas Berenguer

Tutor: Dra. Pura Alfonso Abella

Máster en Ingeniería de Minas

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

Manresa, 13 de Mayo de 2016

ÍNDICE

SUMMARY	4
RESUMEN	5
AGRADECIMIENTOS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ESTUDIOS PREVIOS O ANTECEDENTES	8
3. OBJETIVOS	9
4. PROBLEMÁTICA MUNDIAL DE LA MINERÍA ARTESANAL DE ORO	10
5. CONTAMINACIÓN, SALUD, EXPOSICIÓN Y DETECCIÓN DEL MERCURIO	11
5.1 El mercurio	11
5.2 Toxicidad del mercurio y afectación a la salud	13
5.3 Afección al medioambiente	16
5.4 Exposición de las personas al mercurio	17
5.5 Niveles máximos de mercurio según organizaciones nacionales e internacionales	18
5.6 Evaluación de la exposición. Los biomarcadores	20
5.7 Criterio de elección del biomarcador para el presente estudio	23
6. METODOLOGÍA	24
6.1 Trabajo de campo	24
6.2 Laboratorio	26
6.3 Análisis estadístico de datos	28
7. MINERÍA DEL ORO A BOLIVIA	30
7.1 Contexto geográfico	30
7.2 Contexto geológico	31
7.3 Características de los campamentos mineros	32
7.4 Lugares o puestos de trabajo en las cooperativas	35
7.5 Infraestructura de las minas y extracción del mineral	36
7.6 Infraestructura planta procesamiento y su actual tratamiento	40
7.7 Grado de recuperación del oro y contaminación	43
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. IMPACTO AL ENTORNO SOCIOECONÓMICO	47
8.1 Análisis de cabellos	48
8.1.1 Análisis global de toda la población minera	48
8.1.2 Análisis comparativo por años	49
8.1.3 Análisis comparativo de las cooperativas mineras de Señor de Mayo y Yani	52
8.1.4 Análisis de medias poblacionales según el puesto de trabajo	54

8.1.5 Análisis de contaminación en habitantes de la zona alieno al trabajo minero: niños...	56
8.1.6 Otros factores	56
8.2 Sedimentos y agua.....	57
8.3 Vegetación	59
9. PROPUESTAS DE RECUPERACIÓN DEL MERCURIO Y MÉTODOS ALTERNATIVOS DE PROCESAMIENTO DEL ORO	60
9.1 Propuestas de recuperación del mercurio y extracción del oro	60
9.1.1 Mejoras en la extracción dentro de la mina	60
9.1.2 Mejoras en la trituración y amalgamación	61
9.1.3 Mejoras en la concentración	61
9.1.4 Mejoras en la refinación	62
9.2. Procesos sin usar el mercurio. Uso del Bórax.....	64
10. FUTUROS TRABAJOS Y POSIBLES MEJORAS	65
11. CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFIA	68
ANEXOS	72

SUMMARY

Artisanal and small-scale gold mining represents a very important source of income for miners and their families in rural communities, especially because economic alternatives are too limited. However, extraction methods used by gold miners have a lack of knowledge, technology, culture of prevention, planning, security and good infrastructure, which lead to a big loss of benefit and also an extremely high degree of contamination. One of the most dangerous pollutants that is often emitted during these processes is mercury, used in this type of mining for its amalgamation properties. Unfortunately, mercury causes serious problems of environmental pollution and it undergoes nearby towns to a direct exposure which is very health harmful.

The current study consists in making an assessment on the levels of mercury contamination in three mining cooperatives located in the area of Sorata, department of La Paz in Bolivia. In addition, it proposes alternative methods and advices to reduce this pollution. To perform this study, we firstly did an evaluation of the technical, social status and development of cooperatives and its system of gold mining. Subsequently, we took a sampling of habitants and animals hair, sediments, water, vegetation and amalgamation tails. Later, an analysis of samples in Almadén Labs was made. Finally, with the sample data obtained we did the relevant statistical study, from which we derived our findings and conclusions.

The results show clearly that mercury pollution exceeds the optimal limits established by various global organizations such as the World Health Organization. For this reason, corrective measures that benefit these cooperatives should be applied, and in this study some improvement alternatives are proposed.

RESUMEN

La minería del oro artesanal y en pequeña escala representa una fuente muy importante de ingresos para los mineros y sus familias en las comunidades rurales, sobretodo porque las alternativas económicas son excesivamente limitadas. Sin embargo, los métodos de extracción y procesamiento del oro que usan los mineros carecen de conocimientos, tecnologías, cultura preventiva, planificación, seguridad y buenas infraestructuras, por lo que se suele perder mucho beneficio y además con un grado de contaminación extremadamente alto. Uno de los contaminantes más peligrosos que a menudo es emitido durante estos procesos es el mercurio, usado en éste tipo de minería por sus propiedades amalgamadoras. Desafortunadamente, el mercurio provoca graves problemas de contaminación ambientales y somete a las poblaciones cercanas a una exposición directa muy perjudicial para su salud.

El presente trabajo consiste en realizar una valoración sobre los niveles de contaminación por mercurio en tres cooperativas mineras ubicadas en el área de Sorata, departamento de La Paz, en Bolivia, y proponer consejos y métodos alternativos para reducir dicha contaminación. Para poder realizar éste estudio se hizo en primer lugar un trabajo de campo que consistió en una evaluación del estado técnico, social, y de desarrollo de las cooperativas y su sistema de extracción del oro, seguido por un muestreo de cabellos de los habitantes del pueblo, animales, sedimentos, aguas, vegetación y colas de amalgamación. Seguidamente se procedió a su análisis en los Laboratorios de Almadén, y finalmente se discutieron los resultados obtenidos con la realización de éste trabajo.

Los resultados denotan una clara contaminación del mercurio superando los límites establecidos por diversas organizaciones mundiales, como la Organización Mundial de la Salud. Por este motivo se deben aplicar medidas correctoras que beneficien a éstas cooperativas, y se proponen algunas alternativas de mejora.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi tutora y profesora Pura Alfonso, de la “Escola Politècnica Superior d’Enginyeria de Manresa” por su soporte e implicación durante el desarrollo de éste trabajo.

A l’ONG “Mineria per al Desenvolupament” (MPD) y al “Centre de Cooperació per al Desenvolupament” (CCD), para dejarme participar en el proyecto de cooperación el verano 2014 dónde pude hacer el trabajo de campo, con la ayuda de los otros miembros que me acompañaron. De la misma forma, a la contraparte Cumbre de Sajama, que nos ayudó a conectar mejor y a trazar metas comunes para las poblaciones mineras estudiadas.

A la Escuela de Ingeniería de Minas e Industriales (UCLM) de Almadén, y en especial a Eva María García, por su ayuda para realizar los análisis de cabellos, sedimentos y aguas en el laboratorio de la Universidad.

1. INTRODUCCIÓN

La minería del oro artesanal y en pequeña escala representa una fuente muy importante de ingresos para los mineros y sus familias en las comunidades rurales, sobretodo porque las alternativas económicas son excesivamente limitadas (Seccatore et al., 2014). Desafortunadamente, este tipo de minería se caracteriza por ser la mayor fuente de contaminación de mercurio mundial, presentando graves problemas de contaminación en el medio ambiente y ecosistema, y sometiendo a las poblaciones cercanas una exposición directa y muy perjudicial para su salud (Muñoz et al., 2013).

Los métodos de extracción y procesado del oro que usan los mineros carecen de conocimientos, tecnologías, cultura preventiva, planificación, seguridad y buenas infraestructuras, por lo que se suele perder mucho beneficio y además con un grado de contaminación extremadamente alto. Uno de los contaminantes más peligrosos que a menudo es emitido durante estos procesos es el mercurio.

Es por eso que se deben estudiar e implementar alternativas y medidas correctoras (Telmer and Stapper, 2012) para desarrollar una minería artesanal sostenible, garantizando el máximo beneficio posible al mismo tiempo que un nivel de exposición al mercurio mínimo. En la mayoría de casos, no hace falta métodos muy avanzados ni grandes costes para reducir el uso de mercurio, aunque se debe analizar separadamente los distintos poblados mineros ya que pueden presentar distintos grados de desarrollo.

El presente trabajo está focalizado en determinar el grado de contaminación de mercurio de tres cooperativas mineras de oro (Señor de Mayo Limitada, Yani Limitada y Ingenio Limitada) situadas en el norte del departamento de La Paz, Bolivia, y proponer métodos alternativos para reducir dicha contaminación.

Desde la ONG “Minería para el Desarrollo” de la Universitat Politècnica de Catalunya y con la ayuda de la organización local “Cumbre del Sajama” se están realizando distintos proyectos de cooperación en zonas mineras de Bolivia, con el objetivo de conseguir mejoras medioambientales, sociales y condiciones de trabajo seguras. Con ello se obtiene un doble beneficio ya que, además de lo expuesto, esto permite a los mineros el acceso a vender su oro en el llamado Comercio Justo. Uno de los problemas de muchos mineros artesanales es que cuando venden su oro lo hacen en un mercado que les paga por debajo de su verdadero valor. En cambio, existe un sistema comercial solidario, denominado Comercio Justo, que persigue el desarrollo de los pueblos y la lucha contra la pobreza (<http://comerciojusto.org>) mediante la

retribución adecuada de los insumos que venden los pequeños productores. Para acceder a este comercio los productores deben obtener un certificado o sello que acredita las buenas prácticas realizadas durante la obtención del producto. Se basa en condiciones laborales y salarios adecuados para los productores, la no explotación laboral infantil, la igualdad entre hombres y mujeres, y el respeto al medioambiente. Las cooperativas mineras que llevan la certificación de comercio justo o en concreto un sello como el Fairmined (<http://www.fairmined.org>), presentan numerosos beneficios y aseguran un desarrollo sostenible y responsable.

Este estudio sigue la línea de trabajo de éstas organizaciones, centrándose en la racionalización del uso del mercurio para poder evitar o disminuir la contaminación. El mercurio evaporado proveniente de la actividad minera se dispersa en el ambiente y afecta el agua, suelos, plantas, fauna y habitantes cercanos (Terán-Mita et al., 2012). Se tomaron muestras de las tres cooperativas mineras estudiadas, y se vieron los métodos de trabajo usados, para posteriormente determinar las concentraciones de mercurio en el medioambiente y en los habitantes y proponer medidas correctoras.

2. ESTUDIOS PREVIOS O ANTECEDENTES

La minería artesanal de oro o a pequeña escala en Bolivia es similar a la de los países de Sud América como en Perú o Colombia. Las cooperativas mineras suelen ser poblaciones pequeñas. La mayoría de sus miembros son socios de poco nivel formativo que trabajan de forma temporal en la minería y a veces también en la agricultura. Su capital financiero es limitado, las infraestructuras donde viven son precarias y pueden presentar problemas sociales y culturales. Por eso, las técnicas de extracción de oro que usan son vulnerables a repercutir sobre el medioambiente, y sobre la seguridad y salud de los habitantes y animales.

Se han realizado anteriormente estudios sobre la problemática que presenta la minería artesanal de oro y su difícil desarrollo sostenible (Amezaga et al., 2011), así como los efectos posteriores en la salud humana y contaminación ambiental que presenta el uso del mercurio en el proceso de liberación del oro (Kempson y Lombi, 2011; Cordy et al., 2011). Son muchos los autores que han demostrado la toxicidad del mercurio en la salud para los mineros auríferos y población cercana, indicando los grandes problemas de salud (Eisler, 2003), que suelen derivar en cáncer, problemas respiratorios o neurológicos.

Es frecuente determinar la concentración de mercurio mediante indicadores o marcadores biológicos como las muestras de sangre, la orina, las uñas, o los cabellos, explicando sus ventajas y comparando resultados en distintas poblaciones mineras (WHO, 2008; Hagan et al., 2014). Además, se suele relacionar éstos niveles con distintos factores personales como son el consumo de pescado, el consumo de tabaco, y otros (Z. Castilhos et al., 2015; S. Díez et al., 2011; Ashe, 2012), y con distintas características que pueden presentar los lugares estudiados como son las grandes alturas y la vegetación que hay. En efecto, Terán-Mita (2012) y Muñoz (2013) presentan estudios en dos regiones del Departamento de La Paz, en Bolivia con unas características similares a éste estudio.

No sólo se han analizado y determinado concentraciones de mercurio en los organismos debido al uso del mercurio, sino que también se han encontrado altas concentraciones en sedimentos y aguas cercanas a las zonas mineras (WHO, 2010).

Por otra parte, se han estudiado las técnicas de producción de oro y las plantas de procesamiento utilizadas en la minería de oro a pequeña escala en países sudamericanos indicando su falta de tecnologías limpias y demostrando la poca atención de los gobiernos, instituciones e interés global para hacer evolucionar las poblaciones que viven de los beneficios de la explotación del oro (Veiga, 2014).

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es realizar una valoración sobre los niveles de contaminación por mercurio en tres cooperativas mineras ubicadas en el área de Sorata, departamento de La Paz, Bolivia. Para conseguirlo, se han planteado varios objetivos específicos:

- Analizar muestras de cabellos en habitantes de las áreas estudiadas para demostrar si estos presentan contaminación de mercurio debido a la utilización de este material durante la extracción del oro.
- Analizar muestras de aguas, sedimentos y vegetación de las áreas estudiadas para demostrar si existe contaminación de mercurio en el medioambiente.
- Valorar el contexto social de las tres cooperativas.

- Realizar una propuesta de mejora para ser aplicada durante los siguientes años, de forma continua, en los futuros proyectos de cooperación de la ONG MPD y con la ayuda de organizaciones locales de Bolivia.

4. PROBLEMÁTICA MUNDIAL DE LA MINERÍA ARTESANAL DE ORO

La mayoría de la industria minera se concentra en las grandes empresas, no obstante, en muchas partes del mundo, normalmente en los países subdesarrollados, los minerales se extraen por la minería artesanal y en pequeña escala (MAPE). Este tipo de minería se caracteriza por ser muy rudimentaria, con mano de obra sin muchos recursos económicos, equipos e infraestructuras pobres y en condiciones severas e incluso peligrosas. Principalmente es utilizada en áreas rurales (Abriendo Brecha IIED, 2002).

Sus características principales son las siguientes (<http://www.miningfacts.org>):

- Explotación de depósitos marginales o pequeños, en condiciones a menudo, desfavorables
- Carencia de capital
- Trabajo intensivo con bajos índices de recuperación
- Falta de seguridad en el trabajo
- Impacto en el medioambiente y en la salud humana
- Acceso insuficiente a los mercados y servicios de apoyo
- Falta de conocimientos técnicos

La MAPE es consecuente de una multitud de problemas respecto distintos factores (Hentschel et al., 2003), mostrados en la Tabla 1; no obstante, también es muy importante para muchas comunidades pobres, siendo a veces la única fuente de ingreso. Por eso, es conveniente capitalizar las oportunidades de medios de subsistencia y al mismo tiempo intentar ser una minería de desarrollo sustentable y sostenible. Es necesario entonces, establecer objetivos para asegurar que haya una evolución positiva. En efecto, los mercados de Comercio Justo para los productos de minería, el aumento de conocimientos técnicos de la MAPE, el desarrollo de la capacidad individual y colectivo de los mineros, el cambio de percepción respecto la mujer y trabajo infantil son ejemplos de los objetivos a estimular.

En muchos países la MAPE es parte del sector informal, por lo que genera efectos negativos en los regímenes sociales, ambientales y fiscales del país (Hentschel et al., 2003), este es el caso de Bolivia. En algunos casos, la falta de voluntad política para crear un marco adecuado para la legalización de la MAPE puede ser debido por intereses relacionados con la corrupción, la

política del momento, el lavado de dinero y las actividades ilegales similares (RCS Global, 2016). Cada vez más, los gobiernos nacionales toman más conciencia de la importancia de la MAPE aunque igualmente la aplicación de la legislación y la proporción de ayuda en estas zonas resulta una tarea muy difícil.

Tabla 1. Problemas generados por la MAPE 1

Ambientales	Contaminación con mercurio
	Eliminación directa de relaves y efluentes en los ríos
	Afectación en la fauna y flora
	Daños en la salud de los habitantes de la comunidad
Conflictos sociales	Discriminación de la mujer y trabajo infantil
	Desorganización social
	Posibles daños provocados por la mala seguridad en el trabajo
	Bajos ingresos
Geológicos	Explotación no racional de recursos de alta ley. Pérdida de reservas
	Explotación de yacimientos marginales o muy pequeños, que no son económicamente explotables por la minería mecanizada
Económicos	Salarios laborales e ingresos bajos
	Desarrollo descontrolado
	Costes generados por conflictos sociales

5. CONTAMINACIÓN, SALUD, EXPOSICIÓN Y DETECCIÓN DEL MERCURIO

5.1 El mercurio

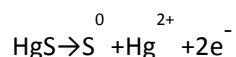
Propiedades

El mercurio es un elemento químico de número atómico 80, masa atómica 200,59 y símbolo Hg. Es presente de forma natural en la corteza terrestre y se encuentra en estado puro o combinado con plata o en forma de sulfuro en el cinabrio. Es un metal líquido a temperatura ordinaria, de color blanco plateado, brillante y denso. El mercurio elemental (Hg^0) es la forma más volátil de mercurio. Únicamente, es soluble en soluciones oxidantes. Forma parte de los metales de transición situados en el bloque “d” de la tabla periódica. Entre sus propiedades destaca por ser un metal de alta dureza, con puntos de ebullición y fusión elevados y de una buena conductividad de la electricidad y el calor (<http://elementos.org.es/mercurio>).

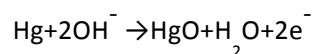
El metal y sus compuestos son muy tóxicos. El mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (por ejemplo, oro, plata, uranio, cobre, plomo, etc).

Compuestos inorgánicos y orgánicos

Además de mercurio metálico Hg^0 , puede existir en forma de iones Hg^{1+} y Hg^{2+} (Greenfacts). El mineral más importante del mercurio es el Cinabrio, y aunque es una forma relativamente estable de mercurio, puede verse transformado en especiaciones indeseables. En medio ácido y oxidante podemos encontrar la siguiente reacción:



Esta reacción pone en solución al mercurio, el que puede así puede formar complejos con la materia orgánica. No obstante, en un medio alcalino oxidante el mercurio precipitará como óxido, una forma más o menos estable, mientras el sistema mantenga la alcalinidad y condiciones oxidantes (Gimarães et al., 2000):



Los compuestos inorgánicos de mercurio son solubles en agua y menos difusibles que el elemental. Se pueden clasificar como sulfuros (HgS), óxidos (HgO), compuestos con halógenos (Hg_2Cl_2 , HgCl_2 , HgF_2 ,...), cianuros ($\text{Hg}(\text{SCN})$) y nitratos y sulfatos ($\text{Hg}_2(\text{NO}_3)$, Hg_2SO_4 ,...) (Wotruba et al., 2000).

Los compuestos orgánicos de mercurio, resultan de la interacción de formas inorgánicas con microorganismos presentes en el agua y son muy solubles en lípidos. Se clasifican en mercurios alcaloides (metilmercurio, etlimercurio,...), mercurios ariloides, por ejemplo el fenilmercurio y diuréticos de mercurio. Estos compuestos, fundamentalmente el metilmercurio, son los que poseen la toxicidad más elevada de todos los componentes del mercurio.

Usos y aplicaciones

El uso del mercurio de mayor popularidad es en termómetros, barómetros, tacómetros, termostatos y en bombas de difusión en técnicas de vacío. En los últimos tiempos, el uso en los termómetros se ha prohibido por su toxicidad (Reglamento UE nº 847/2012). En menor medida, se usa en engranajes eléctricos como material líquida de contacto y en la manufactura de lámparas de vapor de mercurio.

También es muy habitual encontrar mercurio en la odontología, para la fabricación de empastes de dientes. El mercurio se utiliza en amalgamas de plata como material para las

obtuciones de dientes y se estima que hasta un 50% del material está compuesto por mercurio (WHO, 2003).

Finalmente, se pueden encontrar determinadas cantidades de mercurio en pinturas, pesticidas y catalizadores químicos. Se aprecia entonces, una gran cantidad de fuentes de exposición al mercurio.

Producción y venta de mercurio

Los niveles naturales de mercurio en la corteza terrestre varían de un lugar a otro, pero se calcula una estimación media de 50 mg por tonelada de roca. El mercurio se extrae cuando está presente en mineral de cinabrio, que contiene aproximadamente unos 10 kg por tonelada de roca (Greenfacts).

Los principales países productores primarios de mercurio mundiales son China, México, Tayikistán y Rusia en el año 2014. En los últimos quince años se puede apreciar un aumento de la producción de mercurio en países como China, Marruecos, México y Tayikistán, una producción constante en Rusia y USA, y una disminución importante en Kyrgyzstan, Algeria, Finlandia, España, incluso en los tres últimos ha parado su producción (Anexo Tabla 1). El motivo son las políticas gubernamentales nacionales y de la Unión Europea (Reglamento UE nº 847/2012) sobre la prohibición de la venta de mercurio y otras aplicaciones como el uso del mercurio en termómetros el año 2012, creadas para disminuir los riesgos y contaminación que puede comportar el mineral.

5.2 Toxicidad del mercurio y afectación a la salud

El mercurio, incluso en dosis bajas puede causar muchos problemas para la salud del cuerpo humano y organismos (Figura 1).



Figura 1. Toxicidad del mercurio y sus consecuentes daños en la salud
http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/T11-metales.pdf.

Mercurio metálico

La absorción de esta forma de mercurio se realiza principalmente a través de la inhalación de vapores, como se ha observado en la fórmula anterior. En su estado líquido no sufre una absorción significativa en el tracto digestivo pero puede ser absorbido por la piel. Cuando se administra por vía intravenosa, se puede observar de inmediato una embolia pulmonar, incluso sin efectos sistémicos (OPS, 2011).

La exposición a los vapores de mercurio produce una alta concentración de mercurio en los pulmones, al ser absorbido en aproximadamente 80% (Wotruba et al., 2000). Desde los pulmones, el mercurio metálico se distribuye por la sangre y se acumula en altas concentraciones en el cerebro y los riñones. El mercurio también se acumula en la piel, cabello, hígado, glándulas salivales, intestino y testículos (Poulin et al., 2008).

La eliminación del mercurio se produce a través de las heces y la orina, pequeñas cantidades se eliminan a través del sudor, la saliva, las lágrimas y el cabello.

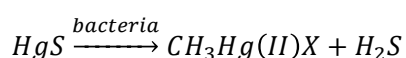
Sales inorgánicas del mercurio

Estos compuestos son corrosivos, causan irritación severa en la piel, y la absorción por esta vía debe ser tomada en cuenta. La absorción de mercurio inorgánico se produce más a menudo a través del tracto digestivo y también por inhalación. Una vez absorbidas, las sales inorgánicas de mercurio pasan a la sangre y se distribuyen por igual entre el plasma y los eritrocitos, se unen a proteínas plasmáticas y grupos sulfhidrilos. En general, la mayor parte del mercurio inorgánico absorbido es depositado en los riñones, el hígado, el tracto intestinal, bazo y los testículos (OPS, 2011).

La eliminación de estos compuestos se efectúa principalmente a través de las heces y secundariamente por la orina.

Compuestos orgánicos del mercurio - metilmercurio

Estos compuestos ingresan fácilmente al organismo por vía respiratoria, gastrointestinal y dérmica. El metilmercurio $[CH_3Hg]^+$ es el compuesto orgánico más frecuente y peligroso. Está presente en la mayoría de las especies acuáticas y se bioacumula en la cadena alimentaria acuática (Poulin et al., 2008). El proceso de transformación de mercurio inorgánico a metilmercurio se da en ambientes sulfato-reductores mediante bacterias. Estas bacterias se encuentran en ambientes anaeróbicos con sedimentos fangosos como pueden ser ríos o lagos (Gimaraes et al., 2000; Zillioux et al., 1993).



Debido a que los animales acumulan metilmercurio más rápido de lo que pueden excretarlo, se produce un incremento sostenido de las concentraciones en la cadena trófica (biomagnificación) (Olivero y Solano, 1998). Así, aunque las concentraciones iniciales de metilmercurio en el agua sean bajas, los procesos biomagnificadores acaban por convertir el metilmercurio en una amenaza real para salud humana.

El metilmercurio donde repercute más en el sistema nervioso, en el desarrollo neurológico y en problemas cardiovasculares. Los síntomas típicos se suelen reconocer después de unas semanas y son un campo visual restringido, pronunciación poco clara, hipersensibilidad anormal, irritación dérmica, hemorragia nasal y depresión (Wotruba et al., 2000).

La eliminación se efectúa principalmente por heces y de forma secundaria por la orina, cabellos y leche materna. La vida media se ha calculado de 100 a 190 días (OPS, 2011).

5.3 Afección al medioambiente

El metal mercurio, como en las personas, afecta gravemente al medioambiente. Entra en el ambiente como resultado de la ruptura de minerales de rocas y suelos a través de la exposición al viento y agua o de la actividad volcánica. Aunque, las concentraciones de mercurio en el medioambiente están creciendo no por fuentes naturales sino debido a la actividad humana. Prácticas como la quema de productos fósiles, fundiciones, combustión de residuos sólidos, procesos industriales, calefacciones y sobretodo la minería (en concreto la propia del mercurio y la del oro) son generadoras de contaminación medioambiental.

En las zonas mineras, los lugares con altas concentraciones de mercurio son las denominadas “zonas mineras críticas” (UNEP, 2008). Estas zonas son fuentes de dispersión del mercurio, ya sea por la vegetación o agua. Normalmente, los mineros suelen verter al río el mercurio no aprovechable en cantidades enormes, y hasta se generan acumulaciones sólidas de mercurio en forma de barro. En consecuencia, los ríos, arroyos o lagos quedan contaminados por largos períodos de tiempo, y se filtran hacia las aguas subterráneas.

Los altos contenidos de mercurio que se encuentran en las aguas alimentan las bacterias del medio acuático transformándolo en metilmercurio, y envenenan los peces que hay en ella, los cuales van acumulando niveles de metilmercurio en sus organismos. Esto afecta la cadena alimenticia (Figura 2). Además, los sedimentos son arrastrados aguas abajo y hace que el problema no sea sólo local. El río Yaní que se encuentra en la zona estudiada, desemboca en el río Amazonas contaminando grandes ecosistemas (Terán-Mita et al., 2013). La contaminación de la fauna y ríos es un peligro para la salud ambiental para las poblaciones que viven aguas debajo de las regiones mineras. Las aguas superficiales ácidas pueden contener grandes concentraciones de mercurio. Cuando los valores de pH están entre cinco y siete, las concentraciones de mercurio en el agua se incrementarán debido a la movilización del mercurio en el suelo.

Los animales como llamas, ovejas o perros que habitan en las regiones mineras, son muy vulnerables de ser también contaminados cuando beben agua del río o comen las vegetaciones afectadas por el mercurio. Además, en Bolivia, las condiciones climáticas extremas limitan el desarrollo del suelo en las zonas mineras ubicadas en entornos de gran

altitud. Estos suelos jóvenes son susceptibles a la contaminación por metales debido a la absorción inadecuada debido a pequeñas cantidades de materia orgánica y arcillas (Muñoz et al., 2013).

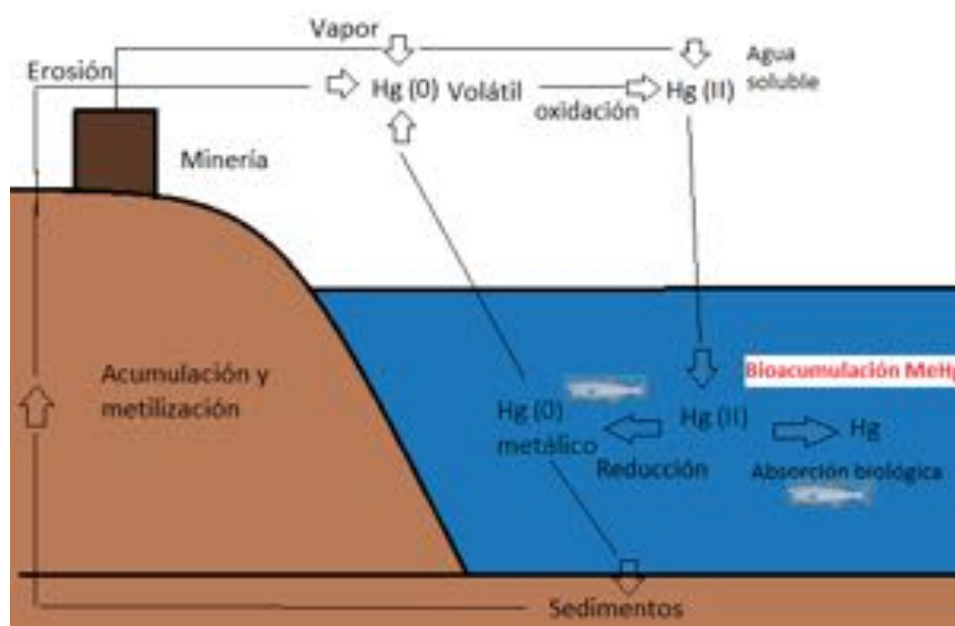


Figura 2. Ciclo del mercurio en el medioambiente

5.4 Exposición de las personas al mercurio

Existen una diversidad de técnicas distintas para recuperar el oro pero en gran parte de las cooperativas artesanales de Bolivia se utiliza el mercurio. Una vez trituradas las rocas que contienen el oro, el que queda liberado es separado del resto de materiales mediante la adición de mercurio. El oro y el mercurio forman una amalgama, es decir, una aleación. La amalgama facilita su separación con el resto debido a su alta densidad; aprovechando el bajo punto de fusión del mercurio, esta malgama es quemada, con lo que se evapora el mercurio y queda el oro. Mediante esta técnica se liberan grandes cantidades de mercurio al ambiente.

La vía de absorción más grande para los mineros es la inhalación del vapor de mercurio liberado durante la quema de las amalgamas (Gul et al., 2015). Se puede absorber el mercurio a través de la piel directamente en aquellas operaciones realizadas manualmente, si no se usan guantes, ni protección adecuada, pero su absorción es mucho menor.

El vapor de mercurio no solamente es peligroso para aquellos que trabajan directamente en la quema de la amalgama, sino que también son vulnerables las personas que viven a los alrededores, ya que se deposita en los edificios, hogares, superficies de preparación de la comida, suelo, y en los depósitos de agua y ríos, los cuales perjudican a los animales que viven en ellos. El vapor de mercurio queda en suspensión en el aire y puede viajar grandes distancias en la atmósfera. Por eso, no necesariamente se tiene que vivir cerca para verse afectado en los efectos del mercurio. La emisión de mercurio puede dispersarse y llegar hasta 50 km lejos (Terán-Mita, 2013).

El polvo de mercurio es otro elemento peligroso, ya que se adhiere a la ropa de los mineros y llega a sus casas. Los mineros de las dos cooperativas estudiadas no suelen cambiarse de ropa a menudo, ni tienen agua potable en casa para ducharse, por lo que es muy frecuente que usen todos los días la misma ropa para trabajar y para estar en sus hogares. Entonces, la propagación de polvo de mercurio es aún mayor.

En conclusión, el mercurio metálico líquido no se absorbe por ingestión o contacto con la piel, sino que es peligroso por su potencial de liberación de vapores de mercurio. Un 80% del vapor de mercurio inhalado se absorbe a través de las vías respiratorias (OPS, 2011). Bajas concentraciones ya pueden alterar el cuerpo y afectar gravemente la salud de la persona. Es importante hacer hincapié en las medidas de seguridad y higiene del trabajador minero de estas cooperativas, así como mejorar las técnicas de extracción del oro y diseñar infraestructuras adecuadas para evitar los problemas de salud generadas por el uso de mercurio.

5.5 Niveles máximos de mercurio según organizaciones nacionales e internacionales

El mercurio se describe como una sustancia toxica peligrosa para el ser humano, por eso, muchas organizaciones internacionales y nacionales han tenido que establecer directivas y normativas para garantizar la salud de las personas y en concreto, de los trabajadores susceptibles a sus efectos.

La Directiva 2009/161/UE de la Comisión Europea, de 17 de Diciembre de 2009 establece una lista de valores límite de exposición profesional indicativos en aplicación de la Directiva 98/24/CE. En su artículo 2 se indica que *“los Estados miembros establecerán valores límite de exposición profesional nacionales para los agentes químicos que figuran en el anexo, tomando en consideración los valores comunitarios”*. En el anexo de la Directiva se puede encontrar un nivel máximo de $0,02 \text{ mg/m}^3$ ⁽¹⁾ para mercurio y compuestos inorgánicos equivalentes del

mercurio, incluidos el óxido de mercurio y el cloruro de mercurio (medidos en mercurio). Ese valor nos da una referencia indicativa pero serán los países dentro de la normativa europea quienes marquen los límites.

Por ejemplo, en España, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo INSHT, señala en las fichas técnicas de mercurio un límite de exposición profesional coincidente con la Directiva de $0,02 \text{ mg/m}^3$, y hasta $30 \mu\text{g/g}$ en creatinina orina y $10 \mu\text{g/l}$ en sangre. Además describe el mercurio como una sustancia tóxica para la reproducción humana de categoría 1B, es decir, con un potencial carcinogénico. Se puede apreciar entonces, una diferenciación de límites según su tipología en ambientales o biológicos. En la guía de buena práctica NTP 184 se exponen y recogen los diferentes límites laborales en función del tipo y del país (Anexo Tablas 2 y 3).

Los límites de exposición biológicos para detectar el mercurio en el cuerpo humano suelen ser a través de la sangre o de la orina, pero también se puede detectar a través del pelo. El límite máximo admisible cabello es de hasta 1 ppm o de $1,1 \mu\text{g/g}$ según Mercuriados, en 2016 (<http://www.mercuriados.org>). La Tabla 2 presenta una recopilación de distintas organizaciones internacionales, con sus niveles máximos permitidos (Tabla 2). No obstante, para las personas que no trabajan con Hg, los niveles suelen ser inferiores a $5 \mu\text{g/l}$ (WHO, 2016), aunque no necesariamente un nivel un poco superior tiene que producir efectos adversos.

Tabla 2. Niveles máximos de mercurio según distintas organizaciones mundiales

Organizaciones		Límites de exposición del mercurio
EPA	Environmental Protection Agency	Límite tolerables = $1 \mu\text{g/g}$ Hg.
WHO	World Health Organization.	Límite tolerables = $2 \mu\text{g/g}$ Hg
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists	Límite tolerables ⁽¹⁾ = $0,025 \text{ mg/m}^3 = 25 \mu\text{g/m}^3$
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	LEP ⁽²⁾ = $0,1 \text{ mg/m}^3 = 100 \mu\text{g/m}^3$
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health	LER ⁽³⁾ vapor Hg = $0,05 \text{ mg/m}^3 = 50 \mu\text{g/m}^3$
		IDLH ⁽⁴⁾ 10 mg/m^3 ($10000 \mu\text{g/m}^3$)

(1) miligramos por metro cubico de aire a 20°C y 101,3KPa.

(2) LEP Límite de exposición permisible

(3) REL límite de exposición recomendado

(4) IDLH Limite que se considera que es un peligro para la vida o la salud

En cuanto a Bolivia, el Protocolo de Vigilancia y Control de Poblaciones Expuestas al Mercurio establece distintos valores de referencia (Tabla 3). Sin embargo, estos valores son solo recomendatorios, no obligatorios. En el Decreto ley 16998 del 1979, que regula la prevención de riesgos laborales, no se encuentra ninguna normativa a cumplir respecto los valores límites de mercurio exigibles.

Tabla 3. Límites máximos de mercurio recomendados en Bolivia. Fuente: Ministerio de Salud y Deportes de Bolivia, Protocolo de vigilancia y control de poblaciones expuestas a mercurio.

Matriz de mercurio	Límite de Hg Máximo permitido	Observaciones
Límites en agua		
Agua potable	0,001 mg/l	Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere este valor
Agua superficial	< 5ng/l	Valores límite en otros tipos de aguas
Agua de riego	0,002 mg/l	Valores límite en otros tipos de aguas
Límites en aire		
Aire	1 µg/m ³	Media aritmética anual
Límites en suelos		
Mariscos	0,3 mg/kg	
Suelos	1 mg/kg	
Suelo seco con pH<7	1,5 mg/kg	
Suelo seco con pH>7	16 mg/kg	
Llodos destinados a uso agrario con pH<7	25 mg/kg	
Llodos destinados a uso agrario con pH>7	0,3 mg/kg	
Índices biológicos		
Mercurio inorgánico total en orina	35 µg/g creatinina	Tiempo de muestreo: antes del turno
Mercurio inorgánico total en sangre	15 µg/l	Tiempo de muestreo: al final del turno del último día de la semana de trabajo
Mercurio inorgánico total en orina	50 µg/g creatinina	
Mercurio inorgánico total en sangre	10 µg/l	

5.6 Evaluación de la exposición. Los biomarcadores

Las exposiciones humanas a contaminantes químicos pueden ser estimadas por la cuantificación de niveles de contaminantes en varios tejidos del cuerpo. Estas medidas se conocen como marcadores biológicos o biomarcadores y se consideran herramientas útiles para la vigilancia en salud y la evaluación de la exposición humana a tales contaminantes (OPS, 2011).

Los biomarcadores son índices de una exposición individual al mercurio, nos dan unos valores comparables con aquellos de referencia y así detectar los efectos adversos en la salud de la persona. Existen muchos medios biológicos que pueden usarse como biomarcadores para la exposición al mercurio: la sangre y la orina, las uñas, la leche humana y los cabellos. (Gul et al., 2015). También podemos utilizar estimaciones proximales de la ingesta de metilmercurio a partir de los alimentos, pero son preferibles las determinaciones fisiopatológicas que evalúan la carga corporal de mercurio como los denominados anteriormente.

Sangre

Las concentraciones de mercurio en la sangre indican una exposición reciente o actual y pueden reflejar tanto la exposición al mercurio elemental como al metilmercurio. Existe una relación directa entre las concentraciones de mercurio en la sangre humana y el consumo de pescado contaminado con metilmercurio pero no siempre se tiene que comer pescado para aborber mercurio (Ashe, 2012). Es un buen método para estimar la exposición a corto plazo.

La sangre es una buena vía para determinar la salud de la persona, aunque, hace complicada su recolección, almacenamiento y transporte de las muestras de sangre en poblaciones como las estudiadas. Además, requiere higiene y material estéril adecuado, profesionales capacitados, y el consentimiento de la persona.

Incluso, se puede usar la sangre del cordón umbilical para determinar las concentraciones de mercurio en el recién nacido. Se ha demostrado que es una muy buena caracterización de la exposición al metilmercurio en los recién nacidos.

Uñas

Las uñas de las manos y los pies son consideradas otro marcador biológico para detectar la exposición al mercurio. De la misma forma que en la sangre, obtener las concentraciones ungueales de mercurio puede ser difícil en aquellas poblaciones expuestas al mercurio elemental. Igualmente, no ha determinado la correlación entre las concentraciones y la exposición al metilmercurio (NRC, 2000), por lo que no es el mejor método de análisis.

Orina

Una de las mejores medidas de exposición al vapor de mercurio inorgánico y al mercurio elemental es la orina. A través de la orina se puede saber los niveles de mercurio que hay en los riñones, los cuales lentamente van excretando el mercurio acumulado a través de la orina.

Los niveles de mercurio en la orina no suelen superar los 5 µg/g de creatinina en personas que no están expuestas al mercurio (WHO y UNEP. Guidance for Identifying Populations at Risk from Mercury Exposure, 2008.)

La creatinina es un producto de descomposición de la creatina, que es una parte importante del músculo. La creatinina es un producto de desecho, es decir, no puede ser utilizado por las células para ningún propósito constructivo. La producción diaria de creatina y creatinina depende de la masa muscular, lo que varía poco en la mayoría de las personas normales durante largos periodos de tiempo. La creatinina es excretada completamente por los riñones, por lo tanto, la medida de mercurio por gramo de creatinina µg es una medida útil de los niveles de mercurio en la orina. Se ha reportado estrecha correlación entre los niveles de mercurio elemental en el aire inhalado y los niveles en orina (OPS, 2011).

Cabello

El cabello es un biomarcador fiable para exposiciones a largo plazo de metilmercurio, ya que cuando el mercurio se incorpora en el cabello que se va formando, no vuelve de nuevo a la sangre. En comparación con la sangre, el mercurio total en el cabello es de aproximadamente 250 a 300 veces mayor que la concentración de mercurio en la sangre en el momento en que el cabello se forma. (OMS/IPCS, 2004). Por lo tanto, es un método muy recomendable para ver la afectación de poblaciones expuestas al mercurio por un largo tiempo.

Aunque el cabello no es tan buen indicador al vapor de mercurio como lo es la orina (Hagan et al., 2014), una ventaja que presenta es que las muestras no son tan difíciles de conseguir en comparación a las de sangre o orina, las cuales son muy invasivas. No hace falta material sanitario, solamente unas tijeras y bolsas cerradas para guardar las muestras. Tampoco se necesitan profesionales expertos, aunque el consentimiento de las personas puede resultar una tarea un poco problemática, sobretodo en poblaciones pequeñas donde el ambiente es más cerrado.

Hay que considerar diversos factores cuando se utiliza el cabello como marcador. En primer lugar la estructura del cabello depende de la etnia, sexo y edad, y eso puede afectar la incorporación del mercurio. Seguidamente, los tratamientos químicos y físicos del cabello pueden remover el mercurio del cabello (Kempson y Lombi, 2011). Finalmente, la parte del cabello más fiable para determinar la concentración de mercurio es el recién nacido, es decir, el cabello más cercano a la cabeza. Para que la muestra sea fiable se tiene que coger más de un cm de largo, ya que el cabello suele crecer a 1 cm y la vida media del MeHg es de 1,5-2

meses. (Díez, 2011). Las otras partes de la cabeza, sobretodo en las personas que tienen el pelo largo, es más posible que se vean afectadas por el ambiente, incorporando polvo y suciedad. Este factor podría alterar el resultado para detectar el nivel de mercurio.

El nivel normal de mercurio en el cabello es de 1 ppm por la US EPA y hasta 2 ppm por la WHO y por la OPS. Esta concentración se puede ver incrementada para las personas que comen pescado una o más veces al día (Castilhos et al., 2015).

5.7 Criterio de elección del biomarcador para el presente estudio

Las concentraciones de mercurio en el organismo se pueden determinar a partir de muestras procedentes de la sangre, la orina, las uñas o los cabellos. Por ello, es necesario considerar diversos factores para una correcta elección. Los equipamientos disponibles, el resultado a conseguir, el recurso humano capacitado, las capacidades del laboratorio, las normativas de cada país, pueden ser elementos determinantes. En cualquier caso, es de vital importancia asegurar un buen control de calidad y la garantía de calidad de los datos obtenidos.

Otra condición para la selección del biomarcador es la dificultad para extraer, almacenar y transportar las muestras. En muchas técnicas se requiere trabajadores profesionales para garantizar una segura y correcta extracción y materiales sanitarios adecuados.

Por último, el grado de invasión hacia la persona para conseguir la muestra deseada es un factor determinante. No hay que olvidar que las poblaciones estudiadas viven a 2-3 horas en vehículo del pueblo más cercano con todos los servicios disponibles y están situadas a la montaña en grandes altitudes. Son poblaciones pequeñas, cuyos habitantes no están acostumbrados a la entrada y salida de personas, no tienen estudios y carecen de infraestructuras y servicios, por lo que su nivel de vida es bajo y su progreso profesional y personal es lento. Por este motivo, la recolección de muestras biológicas puede ser un problema. Hay que concienciar y explicar a los bolivianos de estos campamentos la finalidad y la importancia de la extracción de muestras, de la forma más cercana posible. Muchas veces, son distantes a las personas de cultura distinta a la suya, por lo que es de gran ayuda contar con la experiencia de un autóctono.

Por estos motivos, se ha considerado el cabello el método más fiable, eficaz y apropiado para este estudio. El cabello da resultados a largo plazo, no necesita profesionales ni material sanitario, y es de los métodos más fáciles para obtener el consentimiento de los mineros.

6. METODOLOGIA

Para conseguir los objetivos previamente marcados en este estudio, se ha seguido un procedimiento concreto, que será desarrollado o explicado en esta y siguiente sección. En primer lugar, se obtuvieron las muestras en el campo, seguidamente se trataron con equipos analíticos especiales, posteriormente se analizaron los resultados obtenidos para finalmente, extraer unas conclusiones y proceder a hacer propuestas de mejora en un futuro.

6.1 Trabajo de campo

Se visitaron las minas y los alrededores de las cooperativas de Señor de Mayo, Yani e Ingenio Limitada, para ver cómo se encontraba la mineralización y si existía impacto ambiental, en qué gravedad. También se anotaron las características de los poblados, de la mina y de las plantas de procesamiento para ver su funcionamiento y nivel de tecnificación y conocimiento. Seguidamente se hizo un muestreo de sedimentos, aguas, cabellos, vegetación y colas.

Se obtuvieron 62 muestras de cabello de los mineros y otros habitantes, en 2014. 9 fueron de Ingenio Limitado, 21 de Señor de Mayo y 32 de Yani. En 2015 se repitió el muestreo obteniendo 52 muestras, de las cuales 27 fueron de Señor de Mayo y 25 de Yani. Los datos se pueden considerar representativos ya que la población total de estas cooperativas son de 100 a 200 habitantes. Lamentablemente, no se pudo extraer muestras de todas las personas que trabajaban en las cooperativas, debido al rechazo a conocer su nivel de contaminación.

Las muestras del cabello fueron recolectadas justo en la parte inferior trasera de la cabeza donde termina el cuello (cuero cabelludo), aproximadamente unos 2 cm de largo (Figura 3). De esa forma, se asegura que el pelo sea recién nacido, por lo que absorbe las concentraciones de mercurio del cuerpo. La muestra se introducía dentro de una bolsa de plástico con su código.

Adicionalmente, se hizo una encuesta higiénica a todas las personas muestreadas. Dicha encuesta constaba de los siguientes puntos: código de la muestra, fecha de la encuesta, nombre y apellido, trabajo realizado en la cooperativa, tiempo de trabajo en la cooperativa, lugar de residencia, edad, sexo, contacto con elementos químicos, uso de equipos de protección, presencia durante la quema de la amalgama, consumo de pescado, consumo de alcohol, consumo de tabaco y otros.

Además de las muestras de cabello, también se recolectaron muestras de aguas de distintos puntos para analizar su contaminación. Se cogieron muestras del río Yani antes y después de la planta de procesamiento, y el agua de suministro de los pueblos (Figura 4). Igualmente se obtuvieron muestras de sedimentos del río después de la salida del molino y después de la zona de descarga del material. También se recolectaron plantas y vegetación de los alrededores.



Figura 3: Socia boliviana sacando muestras de pelo a un perro de la cooperativa Yani

Finalmente, se tomaron algunas muestras de la salida de los molinos y colas de amalgamación después de los procesos de tratamiento para conocer el grado de recuperación de oro i ver si se podía observar el oro de la mineralización.



Figura 4. Aguas y sedimentos que hay después de la planta de procesamiento.

6.2 Laboratorio

Los diferentes tipos de muestras recolectadas se trataron y analizaron en el Laboratorio de Biogeoquímica de Metales Pesados (IGeA) de la Universidad de Ingeniería de Almadén. Almadén es la población de España con la mayor experiencia en tratamiento del mercurio gracias a la explotación de la mina durante dos mil años. En 2003 cerró su actividad y sus instalaciones están inscritas en la lista de Patrimonio de la Humanidad con el nombre de Patrimonio del Mercurio.

Se utilizó el equipo de “espectroscopia de absorción atómica con vaporización electrotermica” para determinar la concentración de mercurio total. Para validar el análisis correctamente se debe previamente:

- 1- Calibrar el equipo: Se utilizó el Standard Reference Material, de una muestra calibradora de suelos, Montana I Soil, 2710a NIST, la cual tiene que dar un valor de 9880.
- 2- Validar la muestra de cabellos: Se usó el Certified Reference Material NCS ZC 81002b, que es una muestra de pelo (Human Hair 7g, China National Analysis Center for Iron), y puede dar un valor de 1300 como máximo.

Seguidamente, se introdujo aproximadamente 6mg de cabello dentro de unos pesos avecillas de cuarzo, que luego fueron introducidos dentro del equipo. El análisis (Figura 5) fue repetido tres veces por cada muestra, para garantizar unos resultados fiables. No se puede poner más de 10 mg de pelo porque la materia orgánica hace humo y el equipo no funciona. Por consiguiente, se usó una balanza cerrada para evitar la entrada de aire y así calcular exactamente la cantidad de mg que se metían en la muestra.

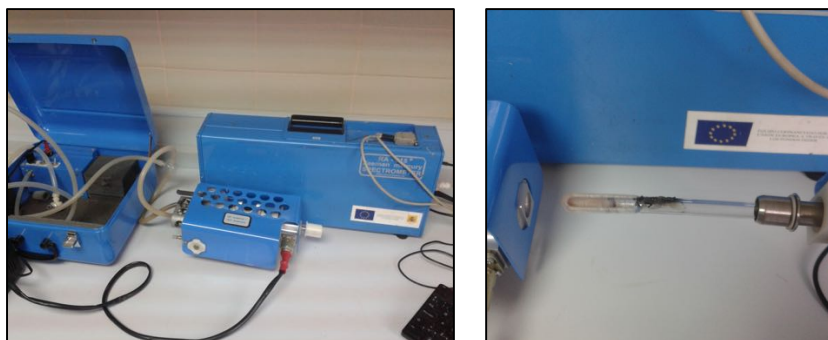


Figura 5. Izquierda: equipo utilizado para determinar la concentración de mercurio a través de una muestra de cabello. Derecha: Pesos de cuarzo donde se pone la muestra

El equipo va conectado a un programa de ordenador donde los valores son calculados y registrados. La intensidad de la lámpara debe ser superior a 16000 unidades de absorción, (línea azul en la parte derecha de la Figura 6).

Se obtuvieron las concentraciones de los cabellos en ng/g (1ppm = 1000 ng/g) así como su desviación estándar (% RSD) para saber la medida de dispersión de las 3 repeticiones de la misma muestra.

En los casos en que las concentraciones eran muy elevadas, consideradas las superiores a 5 ppm o 5000mg/g, se procedió a su lavado con agua destilada y jabón en baño ultrasonido para ser analizadas nuevamente. Lo que se pretende ver con el lavado es si el mercurio detectado la primera vez es causa de la suciedad o polvo incrustado en el pelo, o bien, si realmente el cabello contiene estas cantidades de mercurio. Comparando los dos resultados se pueden sacar las conclusiones.

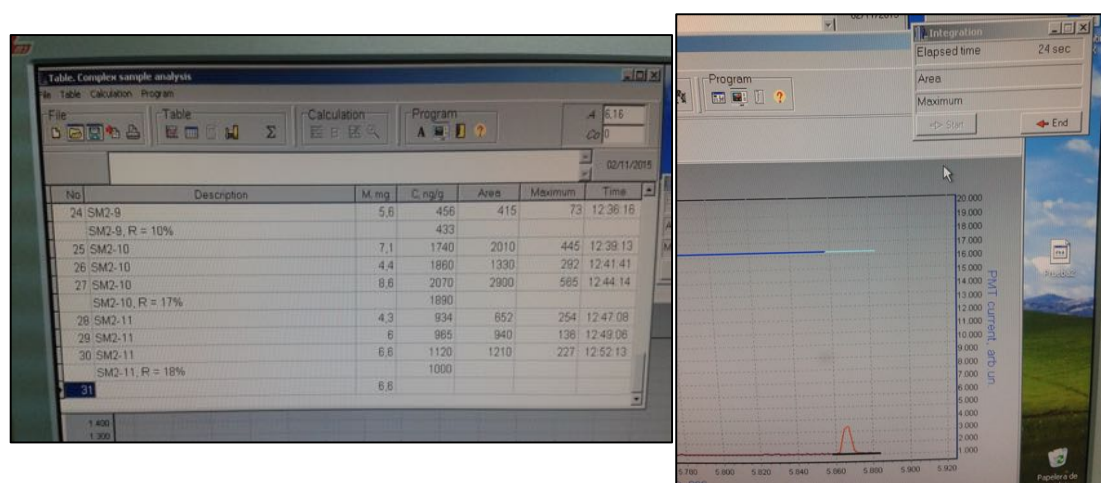


Figura 6. En la parte izquierda, base de datos recolectadas durante el análisis. En la parte derecha, cálculo de la concentración mercurio. La curva roja indica el salto de energías.

Una vez conseguidas las concentraciones de mercurio de todas las muestras, se procedió a listar los resultados obtenidos y su correspondiente cuestionario, con el fin de poder trabajarlos estadísticamente, compararlos y sacar conclusiones. Los resultados están recogidos en el Anexo.

Todas ellas están realizadas mediante AASCV-ZEEMAN y la validación de los análisis se ha llevado a cabo utilizando MRC de pelo humano (NCS ZC 81002b). Las denominaciones de la muestra empiezan con la abreviación de la cooperativa (SM Señor de Mayo, Y Yani y IL Ingenio Limitado), seguido de su número por orden que se sacó la muestra. Las terminaciones acabadas en "L" son muestras lavadas con agua destilada y jabón en baño ultrasonido. Se han

realizado 3 repeticiones por muestra (excepto si no se dispone de suficiente cantidad de muestra) aunque en la tabla ya aparece la media de ellas (Anexo se pueden ver los resultados desglosados).

Por lo que se refiere el análisis de aguas, fueron igualmente analizados en el Laboratorio de la Universidad de Almadén (IGeA), mediante el equipo AFS-CV. Los contenidos en Hg disuelto fueron determinados mediante una filtración previa de las muestras utilizando filtros de jeringa de 0,45 micras (Figura 7).

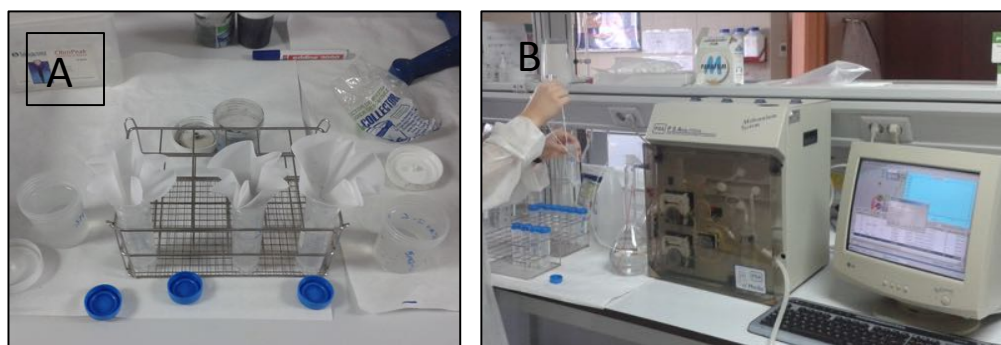


Figura 7. A: Preparación de muestras de agua con filtros de jeringa de 0,45 micras. B: Equipo AFS-CV

Finalmente, para la determinación de mercurio total de los sedimentos y lodos, se usó el equipo AASCV-ZEEMAN. Tanto los lodos como los sedimentos fueron secados mediante liofilización, es decir deshidratarlos sometiénolos a una rápida congelación y eliminando el hielo posteriormente mediante un ligero calentamiento al vacío que lo transforma en vapor. En el caso de los sedimentos fueron, además, molidos en mortero de ágata a un tamaño de partícula <100 micras. La validación del análisis se llevó a cabo utilizando MRC de suelo (CRM026-050).

6.3 Análisis estadístico de datos.

En el trabajo que se ha llevado a cabo hemos realizado distintas pruebas de hipótesis usando el programa Minitab17. Según el objetivo que se perseguía, las poblaciones iban cambiando. Así, la población podía ser la totalidad de los trabajadores de las 3 zonas mineras estudiadas, o bien, los trabajadores de cada una de estas zonas u otros colectivos que ya se especificarán, como los niños que viven en las zonas mineras estudiadas.

Desde el punto de vista estadístico, los resultados obtenidos son muy fiables dado que el tamaño de las muestras es, en la mayoría de las situaciones estudiadas, muy grande. El total

de muestras obtenidas en 2014 es de 32 para Yani, 21 para Señor de Mayo y 9 para Ingenio. El total de muestras en 2015 es de 25 para Yani y 27 para Señor de Mayo. Sumando los dos años se obtuvieron un total de 111 muestras.

Para el contraste de hipótesis simples y complejas se ha probado previamente: (1) la normalidad de los datos (test de normalidad); (2) cuando se contrastan dos poblaciones se han realizado las pruebas de igualdad de variancias (test de homocedasticidad), los resultados de los cuales se han usado para hacer los posteriores tests de diferencia de medias; (3) el procedimiento utilizado para seleccionar los elementos de las muestras ha sido aleatorio.

Cabe decir que de todas los datos de la muestra, dos, presentan una concentración de mercurio excepcionalmente alta, por lo tanto, hemos realizado una prueba de valores atípicos que ha corroborado que estos dos datos, y solamente estos, se debían de descartar. Por lo tanto, estos dos datos no se han usado en ninguna prueba. Todas las decisiones tomadas, en las pruebas de hipótesis realizadas se han hecho mediante el P-valor del test, que se trata de un número entre 0 y 1, y marca el grado de encaje entre las dadas de la muestra y la hipótesis nula, H_0 . Un P-valor elevado indica que hay un buen encaje y la hipótesis nula se acepta. Un valor de P-valor pequeño indica poco encaje y la hipótesis nula se rechaza.

Es relevante decir que en todos los tests llevados a cabo donde el P-valor ha dado muy pequeño (del orden de $P < 0,01$), la decisión de rechazar la hipótesis nula es muy fiable. Éste dato juntamente con el hecho que el tamaño de la muestra es muy grande hace que los dos errores posibles de la prueba de hipótesis sean muy pequeños. Para la mayoría de contrastes realizados, obtenemos conclusiones muy fiables.

En cuanto a la importancia de los dos tipos de errores posibles a cometer tenemos:

- El error de tipo I = α , se produce cuando no hay contaminación pero decidimos que sí la hay.
- El error de tipo II = β , se produce cuando hay contaminación pero concluimos que no la hay.

En definitiva, si se da α aplicaremos medidas que serán innecesarias, y esto implicará costes económicos innecesarios. En cambio, si se da β no haremos nada pero la población minera estudiada continuará contaminándose. Únicamente los tests con P-valor entre $0.025 < 0.10$ tienen riesgo de alcanzar un error de tipo II un poco grande, pero en la gran mayoría de las pruebas realizadas este caso no se ha producido.

7. MINERIA DEL ORO A BOLIVIA

7.1 Contexto geográfico

Las regiones estudiadas están localizadas en el noroeste del Departamento de La Paz, en Bolivia (Figura 8). La población más cercana a las dos cooperativas mineras es la capital de la provincia Larecaja, Sorata a unos 150 km de La Paz. Sorata se sitúa en una zona montañosa a una altitud de 2674m, concretamente al pie del Nevado Illampu, la montaña más alta de Bolivia y tiene aproximadamente 3500 habitantes.



Figura 8. Localización de Sorata, en Bolivia.

Las cooperativas Yani, Señor de Mayo y Ingenio Limitada se encuentran al norte de Sorata (Figura 9), y para llegar a ellas se accede en vehículo por un camino no asfaltado, llegando hasta unos 4000 metros de altitud. Señor de Mayo tiene una alzada de 3825 m y Ingenio Limitado y Yani son incluso más altos, a 4200 y 4270 m. respectivamente. Para mayor detalle en su ubicación se indican las coordenadas de estas poblaciones:

Señor de Mayo: UTM. 549486 / 8270587

Yani: UTM. 547871 / 8267266

Ingenio: UTM. 552367 / 8268486

Actualmente las tres minas funcionan como cooperativas, es decir, en ellas hay una mezcla de socios y trabajadores contratados. Dichos socios son los propietarios de la concesión minera. En ellas también viven mujeres y niños que no trabajan en las minas o planta de tratamiento. Se trata de un tipo de explotación minera muy habitual tanto en Bolivia como en otros países de Sudamérica como Perú, Colombia o Ecuador.



Figura 9. Relieve y localización de Sorata, y las cooperativas Yani y Señor de Mayo

7.2 Contexto geológico

El marco geológico-tectónico de Bolivia se puede dividir en seis provincias fisiográficas: (Figura 10), el Escudo Precámbrico, las llanuras Chaco-Beni, la zona subandina, la Cordillera Oriental, el Altiplano, y la Cordillera Occidental. Las últimas cuatro provincias representan el Mesozoico-Cenozoico Orogénico andino en Bolivia (Arce-Burgoa, 2009), que alberga una gran cantidad de depósitos minerales. El presente trabajo se ha realizado en la zona comprendida dentro de la Cordillera Oriental.

Muchos de los distritos de oro se encuentran en las mismas partes de la Cordillera que tienen mineralizaciones de estaño relacionadas con intrusiones del Mesozoico y Terciario. Las minas de oro de la zona estudiada corresponden a yacimientos de tipo oro orogénico (Haeberlin et al., 2003). Los depósitos de oro orogénico, que forman mantos, vetas, stockworks y minerales diseminados, son principalmente de entre el Ordovícico inferior y el Silúrico. Muchos depósitos, en particular los del cinturón Caracota-Carma-Candelaria, contienen entre un 10 y un 20% de Sb, en consecuencia, muchos de estos fueron explotados originalmente para el antimonio. Estos depósitos tienen típicamente una mineralogía relativamente uniforme y

preservan como mínimo dos eventos paragenéticos principales. Las mineralizaciones más tempranas son de oro y wolframio, con presencia de pirita y arsenopirita (Arce-Burgoa, 2009). Posteriormente, se formaron mineralizaciones de Pb-Zn-Cu-Sb y otros sulfuros.

La mayoría de estos depósitos han sido y están siendo explotados a pequeña escala desde el periodo pre-colonial hasta la actualidad. Actualmente, la mayoría de los depósitos de oro han mostrado leyes promedio de 1 a 3 g / t de oro, algo baja para los filones de oro orogénico. En consecuencia, estos sistemas de vetas tienen muchas más probabilidades de ser explotados en el futuro de forma masiva a través de minería a cielo abierto en lugar de las minas subterráneas de alto grado.

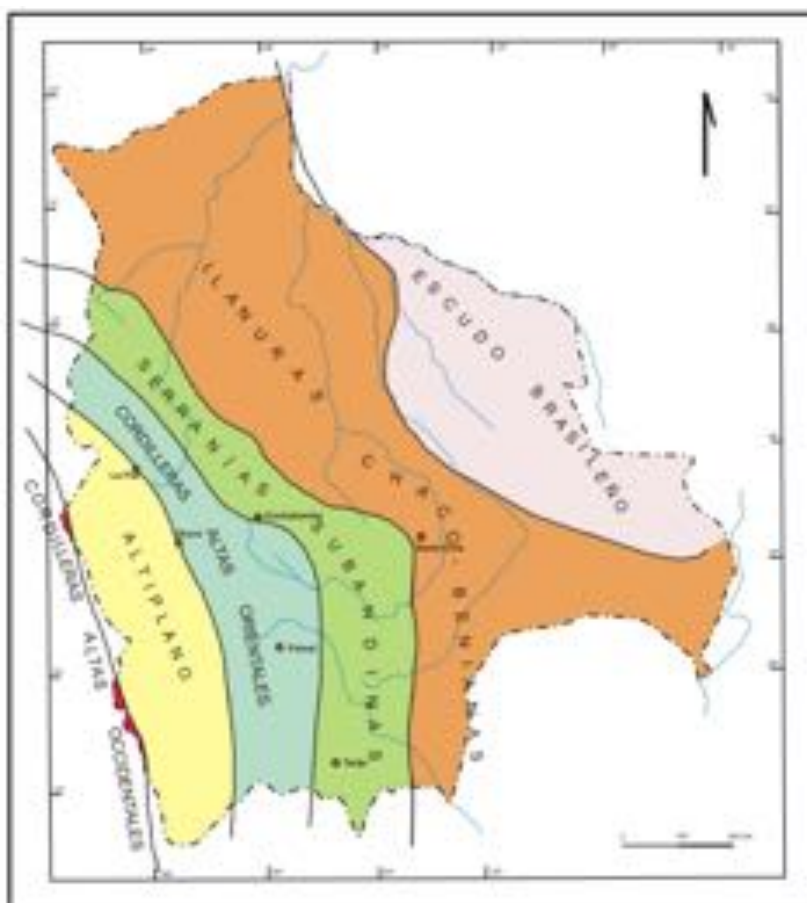


Figura 10. Esquema de las unidades geotécnicas de Bolivia. Modificado de Ahlfeld et al. (1964)

7.3 Características de los campamentos mineros

Yani

La cooperativa Yani tiene 117 socios, de las cuales la mayoría trabajan en la minería y beneficia alrededor de 120 familias. Actualmente viven aproximadamente un 80% de los mineros en el

campamento, los otros repartidos en las comunidades de Yani e Ingenio. La única actividad económica en la zona es la minería.

Para llegar a Yani se tiene que ir en vehículo por camino no asfaltado y se tarda alrededor de 2,5 horas des de Sorata.

No disponen de escuela, la más próxima está a 40 minutos, y por eso hay pocos niños que vivan todo el año allí. A las mujeres no se les permite entrar a la mina porque hay un mito que dice que da mala suerte, y por eso se dedican a las tareas de la casa y en algunas ocasiones, en lavar el oro en el río o en la planta de tratamiento. Algunas mujeres pueden ser socias de la cooperativa pero en ese caso, tienen un representante quién va a entrar a la mina.

El campamento (Figura 11) consiste en pequeñas casitas o habitaciones, una instalación de la cooperativa para hacer reuniones y gestiones, una cancha, una pequeña tienda de víveres, y unos baños comunitarios muy precarios. No disponen de alcantarillado ni de caminos asfaltados, siendo la propia cooperativa quien hace el mantenimiento de éstos. Disponen de servicio de electricidad tanto en el campamento como en la planta de procesamiento, pero desafortunadamente solo disponen de agua corriente en una fuente del campamento. Utilizan el agua de las valles y del río para las labores en la planta de procesado. Tampoco disponen de atención médica y sólo en algunos puntos hay señal para realizar llamadas. Aunque los residuos urbanos que se generan se depositan en una poza sin impermeabilización, hay gran suciedad en el campamento. Se aprecia entonces, una infraestructura muy pobre. El explosivo se almacena en un su polvorín, ubicado dentro del campamento minero.



Figura 11. Campamento minero de Yani

Los mineros en su tiempo libre suelen jugar al fútbol en la cancha que tienen en la plaza del campamento, que es el principal núcleo de reunión. Hay viviendas que tienen televisión.

Señor de Mayo

La cooperativa Señor de Mayo (Figura 12) tiene 103 socios y viven de la actividad minera alrededor de 80 familias. Ésta es la cooperativa más pequeña de las tres estudiadas y probablemente la más precaria. No disponen de escuela, y como en Yani las mujeres no pueden entrar a la mina. Tampoco tienen servicio de atención médica.

Sólo disponen de servicio de agua corriente en algunos puntos del campamento, por eso utilizan el agua del río para las labores del ingenio. Disponen de baños comunitarios con separación entre mujeres y hombres y al lado, es donde se encuentra un pozo para depositar los residuos urbanos, sin ser selladas ni impermeabilizadas. Igualmente, no todos los residuos se depositan en el pozo y que se pueden encontrar algunos en el pueblo. Hay electricidad en el campamento, en la planta de tratamiento y algunas bocaminas aunque a veces hay cortes energéticos.

Las actividades que realizan y las infraestructuras del pueblo son similares a las de Yani, que también es el pueblo que queda más cerca de Señor de Mayo.



Figura 12. Campamento Señor de Mayo des de la bocamina, donde descansan los mineros

Ingenio Limitado

Ingenio Limitado es de las tres cooperativas, la más grande y seguramente avanzada. Tiene aproximadamente unos 200-250 socios. Presentan las mismas características que los otros pueblos, y además disponen de una antena para mejorar el servicio de comunicación con energía fotovoltaica. Existe una poza para depositar los residuos y se multa al personal que tira la basura en el poblado.

Otra diferencia que presenta respecto Señor de Mayo es que el explosivo ya se encuentra almacenado en su correspondiente polvorín, ubicado lejos del campamento minero y cerca de la mina. El polvorín es exclusivo para almacenar explosivos. Dispone de dos cuartos, donde se almacena, la dinamita y el anfo en una, y en la otra, la mecha detonante y los detonadores no eléctricos. Dispone de un responsable para controlar las entradas y salidas.

7.4 Lugares o puestos de trabajo en las cooperativas

En todas las cooperativas se aprecian los mismos puestos de trabajo y realizan las mismas funciones. Además, se suelen organizar en dos turnos de trabajo, mañana y tarde, en la extracción del oro y en tres turnos en la planta de procesado. Los puestos de trabajo identificados son los siguientes:

- **Perforista:** Hace las operaciones de perforación, carga de explosivo y voladura para el avance de las labores mineras.
- **Operario minero:** Transporta el mineral previamente volado del interior de mina a fuera usando vagonetes manuales
- **Operario volquete/retroexcavadora:** Operaciones de carga de los volquetes y transporte del material hasta la planta de tratamiento del mineral.
- **Operario planta de tratamiento:** Alimentación del molino, mezcla de la pulpa con el mercurio, operaciones auxiliares (mantenimiento, limpieza, etc.).
- **Mantenimiento:** Actividades de soldadura, albañilería, fontanería, etc.
- **Quemador amalgama:** Actividad exclusiva de los socios. Aproximadamente una vez al mes se recoge la amalgama (mezcla de mercurio y oro) de la planta de tratamiento y se quema, obteniendo el oro.
- **Plateador o lavadores:** Normalmente mujeres. Se colocan en el curso del río, normalmente aguas debajo de la planta de procesamiento de minerales y mediante pequeñas cantidades de mercurio se intenta recuperar oro de forma manual.

- **Cocinero cantina:** Preparación de la comida de los trabajadores mineros y socios.

7.5 Infraestructura de las minas y extracción del mineral

Las tres minas tienen una infraestructura similar y un método de extracción semejante. Todos se organizan en turnos con diferentes funciones cada uno. El primer turno empieza por la mañana limpiando los buzones. El segundo grupo sigue las mismas operaciones para terminar los buzones preparados y finalmente empieza el último turno, quienes se ocupan de perforar, y disparan los explosivos. Los frentes de explotación son numerosos por lo que es normal hacer varias explosiones al mismo instante de tiempo. La voladura se realiza con dinamita y anfo mediante detonadores no eléctricos y cordón detonante.

Las galerías tienen una longitud y anchura variables. Normalmente, la bocamina y la galería principal son las que tienen una dimensión mayor, y luego se va estrechando conforme avanza la mina. En algunos tramos y en los lugares más remotos, el minero debe agacharse para no chocar con la cabeza e incluso en algunos puntos, sólo los mineros más pequeños y habilidosos pueden acceder.

El interior de la mina tiene una temperatura baja y una elevada humedad. No suele haber ventilación mecanizada en la mina. La seguridad en su interior es muy pobre, ya que la mayoría de galerías no tienen más sostenimiento que la misma roca encajante. No obstante, en algunas galerías podemos encontrar sostenimiento con mampostería de madera (Figura 13).



Figura 13. Chimeneas de traspase de mineral entre niveles, nombradas buzones.

El método de avance en la mina o sistema de explotación, es sin ninguna trayectoria ni planificación. No se dispone de cartografía ni equipos topográficos por lo que los mineros van siguiendo la veta. La dirección de la vetas es inclinada, aproximadamente unos 60º, y están ramificadas.

Es difícil determinar exactamente en donde se encuentra el oro y haría falta un estudio geológico detallado. Sin embargo, hay más probabilidad de haber oro en aquellas vetas y mantos más recientes, o formadas en último lugar, y que cortan la estructura de la roca. (Figura 14).



Figura 14. Vetos en la minas de Yani, Señor de Mayo e Ingenio por orden de izquierda a derecha

Para su perforación, se utiliza un martillo perforador neumático gracias a la disponibilidad de distintos compresores alimentados con combustible de gasoil (Figura 15). No hay ningún sistema de voladura predeterminado, sin retacado ni se prevé ningún tipo de seguridad. Las voladuras se realizan con hidrogel y anfo y se inician mediante detonadores no eléctricos y cordón detonante.



Figura 15. Martillos neumáticos utilizados para perforar y preparación previa de los explosivos, "encebado".

Una vez el material es volado o arrancado, se procede a su recolección y transporte hacia el exterior, y la limpieza de los tajos generados. La mina dispone de buzones a distintos niveles para sacar la carga hacia el exterior mediante vagonetas de arrastre manual (Figura 16).



Figura 16. Una de las bocaminas de Señor de Mayo. Los mineros salen con la volqueta para tirar el material

En el exterior se vierte directamente al volquete (Figura 17) mecanizado que llevará mena y ganga en la planta de tratamiento (ellos también la llaman Ingenio) o se acopia para ser más tarde cargado en la volqueta mediante una pala cargadora.



Figura 17. Minero volcando el material que irá a la planta de procesamiento

Yani

La mina de Yani queda a unos 2km del campamento, situada pasado la planta de tratamiento, por lo que se suele llegar en camiones. Hay distintas bocaminas, aproximadamente 7 están en activo y están situadas en dos valles (Este y Oeste). Actualmente se está construyendo una galería que une los dos lados del cerro.

No hay ningún mecanismo para la ventilación de la mina, sólo se dispone de algunas chimeneas para ventilación natural. La cooperativa no proporciona equipos de protección para los mineros, siendo ellos quienes deben llevárselo aunque no es requisito para trabajar. Suelen llevar casco, luz, botas y guantes (Figura 18).



Figura 18. Equipos de protección individual de un minero: Casco, luz y guantes

Yani también dispone de alguna retroexcavadora y una pala cargadora para distintos trabajos. Las minas de Yani están a cargo de la cooperativa, quién se queda el beneficio y luego se reparte entre los trabajadores. Se organizan en grupos de trabajo y turnos de mañana y tarde, durante 6 días por semana (de lunes a sábado).

Señor de Mayo

También trabajan un yacimiento primario, veta de cuarzo con mineral de oro. Se pueden encontrar 10 bocaminas, aunque solo 4 de ellas se utilizan para extraer mineral, las otras sirven para tener un mejor acceso a los distintos subniveles. Están a 2 minutos del centro del poblado y se accede por un camino de pendiente ascendiente pronunciada. Probablemente es la mina más pequeña y carece de mucha seguridad.

Ingenio Limitado

La concesión de Ingenio tiene varias cuadrículas mineras con distintas bocaminas (unas 5 sirven para extraer el mineral) las cuales están cerradas al acceso no autorizado mediante puertas y candados. Las bocaminas se encuentran distribuidas entre 10 hasta 30 minutos del poblado y se accede por un camino de pendiente descendiente pronunciada. El material que sale de la mina es llevado a la planta de tratamiento mediante volquetes cargadas con pala cargadora.

Existe equipo de ventilación y un responsable de bombas de agua para sacar el agua de los distintos niveles. Se puede decir que el método de extracción es semimecanizado, siendo el más mecanizado de los tres pueblos, por su maquinaria.

7.6 Infraestructura planta procesamiento y su actual tratamiento

Las plantas de procesamiento (Ingenios) de las tres cooperativas aunque presentan diferencias de estado, infraestructura, número de máquinas y seguridad, siguen el mismo proceso para extraer el oro.

En su interior, disponen de bolas de acero de distintos diámetros (de 5 a 20 cm). Las labores empiezan cuando se tira el material explotado en las minas en los molinos de bolas, y se le añade agua y mercurio (Figura 19.A). El agua es procedente del mismo valle que la mina, donde se canaliza hasta llegar a Ingenio, y el mercurio se compra en Perú, aunque en el pasado se usaba el mercurio de España.

Las bolas de acero trituran el mineral al ir girando, consiguiendo la amalgamación de las partículas de oro con el mercurio presente. Se añade mercurio dos veces al día, contando que la planta está 24 horas funcionando. En total se usa aproximadamente 400 g de mercurio en día y por molino. Solo se recupera el mercurio en las operaciones de limpieza del molino, una vez al mes. No obstante, el mercurio no recuperado no vuelve a introducirse en los molinos, si no que se vierte al río.

Del molino, salen los relaves (las partículas finas que el agua ha empujado) que van por unas canaletas y finalmente se hecha al río. Estas canaletas son de madera y tienen unas láminas de cobre o alfombras, y tienen la función de recuperar una parte del posible oro y mercurio que no se ha quedado en el molino (Figura 19.B).

Seguidamente, el relave se divide en 2 cursos en que cada uno transcurre por una mesa concentradora (Figura 19.C) y finalmente se vierte todo al río. Las mesas concentradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. De lo que se recupera de las canaletas, se introduce en un pequeño molino amalgamador.



Figura 19. A: Material que entra en el molino, B: Material sale del molino a través de canaletas, C: El material llega en las mesas concentradoras

Finalmente, se obtiene la amalgama y se quema en la retorta (Figura 20), situada en un cuarto separado. La retorta libera el oro y al mismo tiempo recupera una parte del mercurio. De todas formas, la recuperación no es muy eficaz ya que normalmente se recupera solamente entre un 30% y 40% (Veiga et al., 2014). El objetivo del uso de la retorta es evitar o disminuir la dispersión de los vapores de mercurio en el ambiente producidos durante el refogado de la amalgama. Los vapores de mercurio se condensan y se retienen en los tubos de enfriamiento.



Figura 20. Retorta procedente de Yani, donde se quema el oro con el mercurio.

Yani

La planta de procesamiento de Yani, se sitúa a 1 km aproximadamente del campamento, en el camino hacia las minas. Su infraestructura es muy rudimentaria y carece de seguridad (Figura 21). Sólo hay un tejado con condiciones y estabilidad inestables, se puede apreciar bigas en mal estado.



Figura 21. Infraestructura planta de procesamiento de Yani. Tejado con condiciones inestables

Señor de Mayo

El ingenio está al lado del campamento, Los equipos están protegidos por un tejado en buenas condiciones, pero algunas bigas necesitan ser revisadas. La actividad en el ingenio se divide en 4 turnos de 6 horas en grupos de 3 personas.

La cooperativa tiene 3 molinos de bolas (actualmente 2 en uso), que reciben el material de la explotación sin previa trituración, tal como sale de la galería, funcionan las 24 horas, se alimentan con electricidad y donde se realiza la mezcla agua (de la propia agua que baja del cerro que la tienen canalizada mediante una balsa al lado del ingenio), material y mercurio.

Ingenio

El ingenio, o planta de tratamiento, está al lado del campamento. Los equipos están protegidos por un tejado en buenas condiciones, se apreciaron algunas bigas con perfilaría metálica, y se aprecia que están realizando labores de mantenimiento. Se observa un puente grúa, útil para realizar los cambios de los molinos cuando estos ya están desgastados.

La actividad en el ingenio se divide en 4 turnos de 6 horas en grupos de 3 personas. Ingenio es la cooperativa que presenta una seguridad más elevada. En toda la planta se pueden encontrar rételos de aviso y obligatoriedad de uso de equipos de protección personal, y también de peligro y prohibición (Figura 22).



Figura 22. Rételos de prohibición de actividades y aviso de peligro en la planta de tratamiento de Ingenio

7.7 Grado de recuperación del oro y contaminación

Hemos visto que el procedimiento para recuperar el oro que usan los mineros en la zona de estudio es muy sencillo, con bajos costos y utilizando equipos y materiales generalmente de manufactura nacional. Sin embargo, la minería artesanal tiene unos efectos negativos muy

graves sobre el medio ambiente, produciendo una alta contaminación. Se usan grandes cantidades de mercurio que posteriormente no son aprovechadas o recuperadas y su destino final es el río. Además, se pierden concentraciones muy altas de oro, por lo que se demuestra que el método que se está utilizando no es el adecuado. A continuación se encuentran, por orden de extracción, las actividades, trabajos o procesos que generan pérdidas de oro y por lo tanto necesitan ser mejoradas:

1. **Extracción del material contenido en las vetas dentro de la mina.** Se ha visto que no todo el material que los mineros están extrayendo actualmente para ser tratado posteriormente en la planta de tratamiento, contienen oro. Es por eso, que pueden estar un tiempo, incluso días, que no recuperen absolutamente nada de oro, lo que provoca una gran pérdida de tiempo, mano de obra, electricidad y mercurio, beneficio nulo y además generan residuos y contaminación.
2. **Amalgamación de todo el mineral en molinos de bolas rudimentarios.** Es la primera operación que se realiza en la planta de procesamiento y dónde se añade por primera vez el mercurio. El material es introducido dentro de los molinos con bolas que van girando y triturando el material. Los mineros aprovechan la etapa de trituración y molienda del mineral para realizar simultáneamente el proceso de amalgamación. En este proceso, una parte de la amalgama se queda en el recipiente del molino, y la otra parte es parcialmente recuperada por métodos gravimétricos como son las canaletas. No obstante, las pérdidas del mercurio o harina de mercurio “floured mercury” en las colas son muy altas. En muchos casos sólo el 10% del mercurio agregado a un barril se combina con el oro para producir la amalgama. El resto (el 90%) es sobrante y debe retirarse y reciclarse, o se libera en el medio ambiente (Telmer y Stapper, 2012). Pocas veces se recupera más del 40% del oro.
3. **Canaletas y mesas concentradoras.** La mezcla de oro y mercurio circulan por las canaletas después de salir del molino, las cuales dependen del peso específico del mercurio y pueden recuperar una parte de los flóculos de amalgama. Es un buen método para mejorar la contaminación ambiental en flujo abierto, por lo que se deberían instalar canaletas con alfombras en las colas de las plantas amalgamadoras y así recuperar el mercurio perdido. Éste método es más eficaz que las trampas de mercurio y planchas de amalgamación. Seguidamente llegan a

las mesas concentradoras, un método gravimétrico bueno para la extracción del oro. Aun así, las canaletas y mesas son rudimentarias y no pueden recuperar totalmente el oro ni el mercurio perdido, por lo que siguen generando grandes colas de amalgamación.

4. **Quemado de la amalgama.** Finalmente se quema la amalgama en la retorta, para separar el oro del mercurio. Los efectos que produce su uso son notablemente superiores a los generados durante el proceso de amalgamación. Esto es porque el mercurio es más peligroso cuando está en vapor que en sólido o líquido.

Las partes de la retorta son una cámara de quemado, un tanque de enfriamiento, tubos de enfriamiento y condensación, tasa de recolección de mercurio condensado, un tubo de retorno y un motor o extractor (Figura 23). Su funcionamiento empieza con el extractor, encargado de provocar la circulación de aire que ingresa por los tubos de enfriamiento de acero inoxidable conectados a la cámara de quemado. Los tubos atraviesan el tanque de enfriamiento hacia el recipiente de recolección, donde descarga el mercurio condensado. Finalmente la corriente de aire vuelve por los tubos de retorno hacia el extractor, accionado por un motor, y sale el aire por la chimenea.

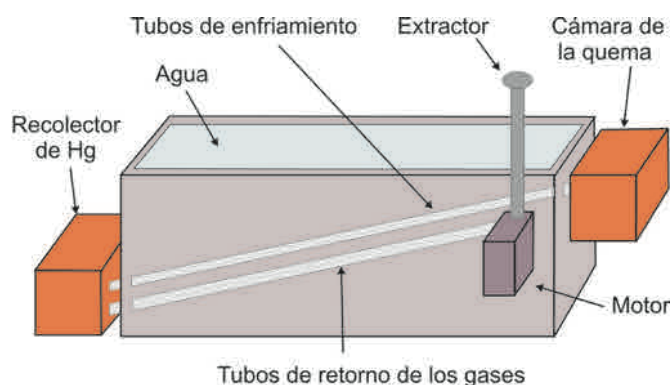


Figura 23. Partes de una retorta.

El problema principal que presenta la retorta es que el vapor de mercurio que hay dentro de los tubos de enfriamiento se condensa, por lo que las gotas más gruesas se adhieren a las paredes del tubo y caen por gravedad en la tasa de recolección. Otras se quedan en las paredes y las más pequeñas son las que forman la llamada harina de mercurio. También, durante el enfriamiento se encuentran partículas que no condensan y eso provoca que circulen por los tubos llegando a la turbina y condensan en las paredes de la caja del extractor. Las retortas recuperan sólo

entre un 30 y 40%. y , además generan vapor de mercurio, altamente nocivo para la salud de las personas.

5. **Proceso de concentración gravimétrica o “cribado”.** Se utiliza una batea donde se pone el mineral que contiene oro (de las colas de amalgamación) y luego se agrega el mercurio concentrado para amalgamar. Las partículas más pesadas se quedan en la batea, mientras que el agua se lleva las partículas más livianas. Este proceso es muy lento y depende de la habilidad del bateador de recuperar más o menos oro, por lo que suele perder mercurio y oro que va directamente al río. En la MAPE se pierde entre un 10% y un 15% del mercurio en consecuencia de este proceso (Telmer y Stapper., 2012).

Es muy habitual ver las mujeres de la cooperativa practicando el proceso de cribado, junto al río (Figura 24). Su protección suele ser muy precaria. Normalmente llevan botas e incluso hay muchas mujeres que no llevan guantes de protección.



Figura 24. Mujeres de Yani cribando el oro.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. IMPACTO AL ENTORNO SOCIOECONÓMICO

Los análisis de contenido en mercurio de las muestras de cabellos obtenidas se encuentran recogidos en la Figura 25, para las cooperativas de Señor de Mayo y Yani en los años 2014 y 2015 e Ingeni Limitada en 2014.

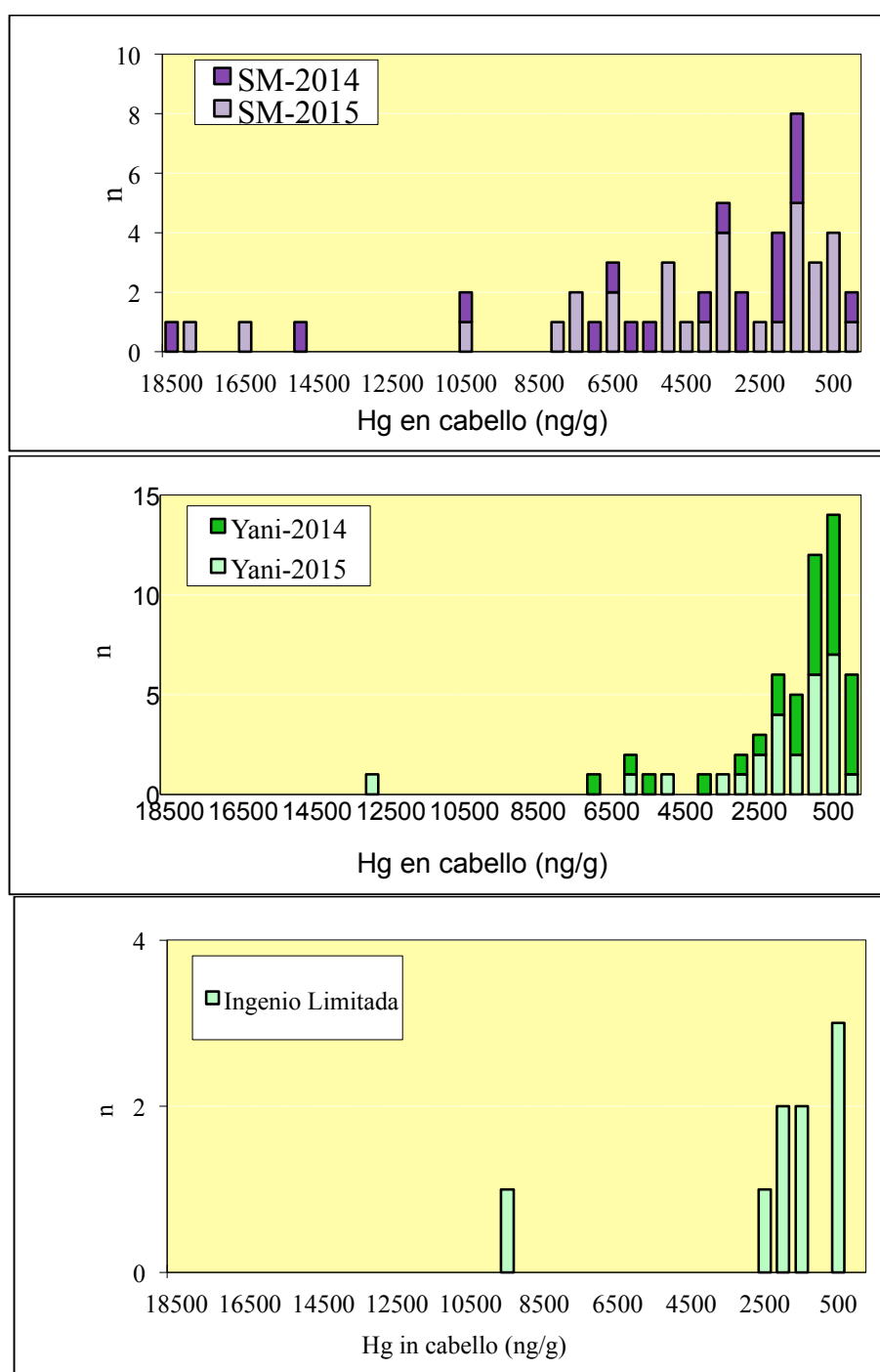


Figura 25. Concentración de mercurio (ng/g) de Señor de Mayo y Yani (excepto tres valores: 23000, 48000 y 136000 ng/g)

Seguidamente se irán presentando los resultados específicos y se discutirán éstos resultados en base a los niveles máximos permitidos de 2ppm por WHO. Otros criterios son más o menos exigentes como por ejemplo, la US EPA que exige un 1 ppm. El presente trabajo ha tomado como referencia el límite establecido por la WHO, de 2 ppm.

8.1 Análisis de cabellos

8.1.1 Análisis global de toda la población minera

Un primer análisis descriptivo de todos los datos conjuntos, es decir, englobando las muestras de 2014 y 2015 y para las tres regiones mineras estudiadas: Y, SM e IL, se expone a la Tabla de a continuación (Tabla 4). Se muestra la N, que indica el número de muestras, la Media que indica la concentración media de mercurio en ng/g, la desviación estándar, el valor mínimo y máximo, el cuartil 1 y 3, y la mediana. Estos valores no deben mirarse por sí solos, sino que se deben analizar con la ayuda de la prueba de hipótesis.

Tabla 4. Análisis descriptivo de todos los datos conjuntamente. Los valores representan contenidos de mercurio en cabello (ng/g)

N	Media	ESmedia	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
110	3861	580	6085	280	990	1890	3975	48400

La prueba de hipótesis (Tabla 5) que contrasta si se supera el umbral de contaminación permitido es de $\mu = 2000$ vs. > 2000

Tabla 5. Prueba de hipótesis muestras totales. Valores de contenido de mercurio en cabello (ng/g).

N	Media	Desv. Est.	ESmedia	Límite inferior de 95%	T	P
109	3452	4340	416	2762	3,49	0,000

La conclusión es irrefutable puesto que el p-valor es el menor posible, por lo tanto la evidencia de que el nivel de contaminación está por encima del umbral aceptable es total. Los resultados obtenidos en los dos años de todas las cooperativas indican que de 111 muestras, 53 tienen unos niveles superiores a 2 ppm y 82 superiores a 1 ppm. En porcentaje representa un 48% de las muestras contienen concentraciones superiores a 2ppm y un 74% superiores a 1ppm.

Por este motivo es necesario que se implementen medidas correctoras para reducir el nivel de mercurio en las poblaciones mineras estudiadas. Además, se ha realizado la misma prueba desglosada para cada una de las tres zonas mineras. Se ha observado que mientras para SM el nivel de contaminación es desmesuradamente alto, para cada una de las otras dos zonas mineras Y e IL, el nivel de contaminación observado es más bien moderado, si bien en ambos casos la media supera claramente el umbral de 2 ppm. Este estudio posterior permite distinguir claramente entre SM que presenta un nivel de contaminación altísimo y las otras dos regiones que también presentan un nivel de contaminación superior al deseado pero mucho más moderado. Es importante matizar que para la zona IL los datos de la muestra son muy pequeños, por lo tanto la conclusión es menos fiable que para las zonas de SM e Y.

8.1.2 Análisis comparativo por años

Posteriormente se pretendió ver si había diferencias significativas entre la población estudiada en el año 2014 con la del 2015.

Las pruebas de homocedasticidad, concluyen con claridad que se puede aceptar la igualdad de varianzas de las muestras. Por ello, realizaremos después el test de diferencia de medias poblacionales suponiendo igualdad de varianzas. El resultado obtenido para la primera prueba es el siguiente (Figura 26):

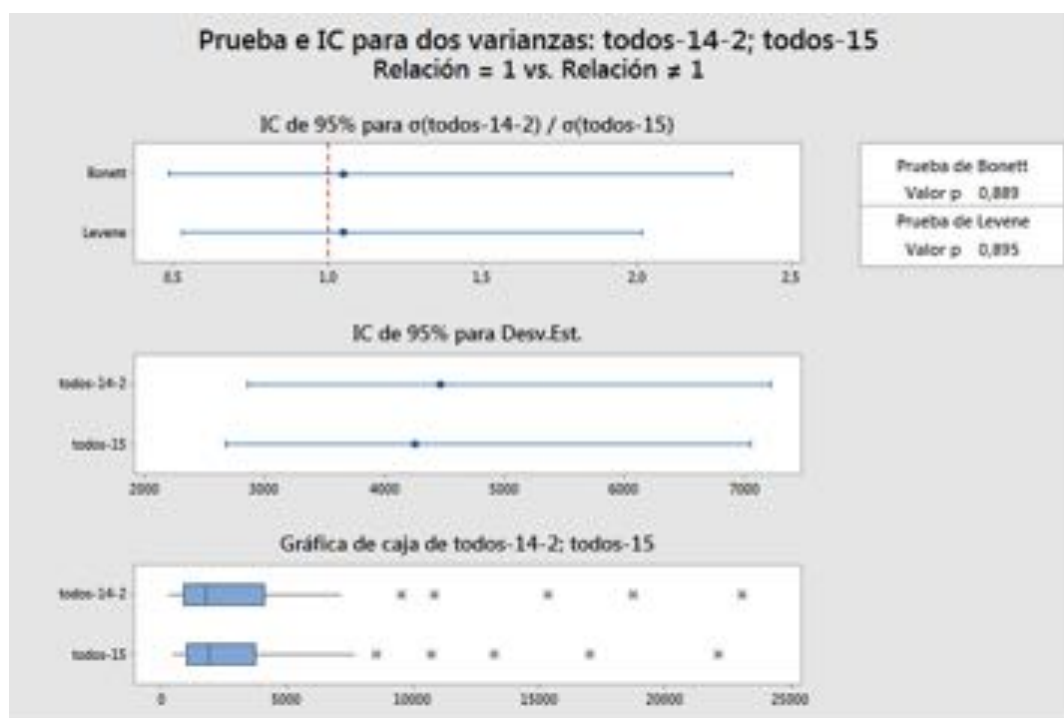


Figura 26: Prueba e IC para dos varianzas: 2014 y 2015

Los p-valores, utilizando diferentes pruebas, son aproximadamente 0,9 por lo cual no hay ninguna evidencia para suponer que las varianzas poblacionales sean distintas. El resultado del test de diferencia de muestras poblacionales se muestra en la Tabla 6. Todos-14-2 son todas las muestras obtenidas en 2014 excepto dos las cuales tienen valores muy lejanos respecto el resto y por lo tanto no se han considerado. Todos-15 son todas las muestras del año 2015.

Tabla 6. Prueba “T de dos muestras” para las 2014 vs 2015

	N	ES Media	Desv. Est	Media
Todos-14-2	57	3451	4455	590
Todos-15	52	3454	4253	594
Diferencia = μ (todos-14-2) - μ (todos-15)				
Estimación de la diferencia: -3				
IC de 95% para la diferencia: (-1657; 1651)				
Prueba T de diferencia = 0 (vs. \neq): Valor T = -0,00 Valor p = 0,997 GL = 106				

El p-valor es prácticamente igual a 1, lo cual evidencia que no existen diferencias significativas entre los niveles de contaminación entre 2014 y 2015. Por ello se ha procedido a realizar un test de datos pareados que es mucho más fiable que el anterior aunque contiene menos datos muestrales.. Es interesante ver su evolución respecto al año anterior para saber si el estado de salud mejora o empeora en función del tiempo, cargo en la cooperativa y contacto con el Hg. Por ello hemos tomado esta submuestra y hemos podido aplicar una prueba de comparación de medias para las poblaciones pareada.

El resultado que hemos obtenido muestra un p-valor de 0,26, que es muy inferior al obtenido anteriormente con todos los datos de la muestra (Tabla 7). Sin embargo, al ser 0,26 bastante superior a un nivel de significación estándar, por ejemplo de 0,05, no hay evidencia suficiente para suponer que los niveles de contaminación para los dos años sean diferentes.

Tabla 7. IC y Prueba “T pareada” para 2014-pa y 2015-pa

	N	ES Media	Desv. Est	Media
2014-pa	9	20631	43503	14501
2015-pa	9	5623	7008	2336
Diferencia	9	15008	37116	12372
IC de 95% para la diferencia media: (-13521; 43538)				
Prueba t de diferencia media = 0 (vs. \neq 0): Valor T = 1,21 Valor p = 0,260				

A continuación se muestran las concentraciones de éstas mismas personas en los años 2014 y 2015 (Tabla 8). Aunque, como se ha comprobado, no se puede suponer que los niveles de contaminación sean distintos para los dos años, se puede apreciar que en 2015 las concentraciones disminuyen ligeramente. En el caso de Señor de Mayo, se puede justificar esta bajada en el cambio de cargo ya que las tareas realizadas en 2015 no tienen tanto contacto directo con el Hg, por ejemplo de lavado a jefe o de la planta de tratamiento a la base. De todas formas, el análisis de cabellos nos indica el mercurio a largo plazo, por lo que los trabajadores 1, 2, 3 y 4 aún contienen altas tasas de mercurio, 10,7 ppm, 3,7ppm, 22,1 ppm y 6,8 ppm respectivamente.

En el caso de Yani, no hay un cambio significativo del cargo ni contacto con el Hg, aunque el trabajador 8 sigue presentando altas concentraciones de mercurio en el cuerpo (3 ppm).

Tabla 8. Concentraciones de Hg (ng/g) en los cabellos en las mismas personas, años 2014 y 2015

SEÑOR DE MAYO		1	2	3	4	5
Edad	2014-2015	37-38	27-28	59-60	25-26	60-61
Cargo	2014	Lavado	Palista	Planta	Minero	Socio
	2015	Jefe Maquinaria	Base	Base, Agricultor	Soldador	Base
Hg, ng/g	2014	15300	6860	136000	10800	5760
	2015	10700	3760	22100	6800	1710

YANI		6	7	8	9
Edad	2014-2015	35-36	30-31	50-52	28-30
Cargo	2014	Socio	Socio	Minero	Socio
	2015	Minero	Minero, agricultor	Minero, comerciante	Minero
Hg, ng/g	2014	2030	1160	5880	1890
	2015	572	1140	2990	833

De ahí, se puede concluir que las actividades realizadas por un periodo de tiempo repercuten a largo plazo, porque aunque la cantidad de mercurio puede haber disminuido desde el cese de la actividad, siguen residiendo en el cuerpo altas cantidades de mercurio que repercutirán negativamente en la salud de la persona.

8.1.3 Análisis comparativo de las cooperativas mineras de Señor de Mayo y Yani

En este apartado se pretende comparar las cooperativas mineras de Señor de Mayo y Yani entre ellas para detectar la zona que presenta una mayor contaminación y así poder establecer un orden prioritario en cuanto a las medidas correctoras a aplicar. Estas dos zonas mineras son las que disponemos más muestras (46 en SM y 54 en Y), tanto en 2014 como en 2015, siendo un número muy abundante respecto la población total y por lo tanto, los resultados serán muy representativos.

Las pruebas de contraste de varianzas muestran un p-valor cercano a 0, lo cual nos indica que las varianzas de ambas poblaciones son distintas (este resultado ya se intuía puesto que las desviaciones estándares eran muy dispares). Por ello procedemos a realizar la prueba de comparación de medias poblacionales con varianzas distintas (Figura 27)

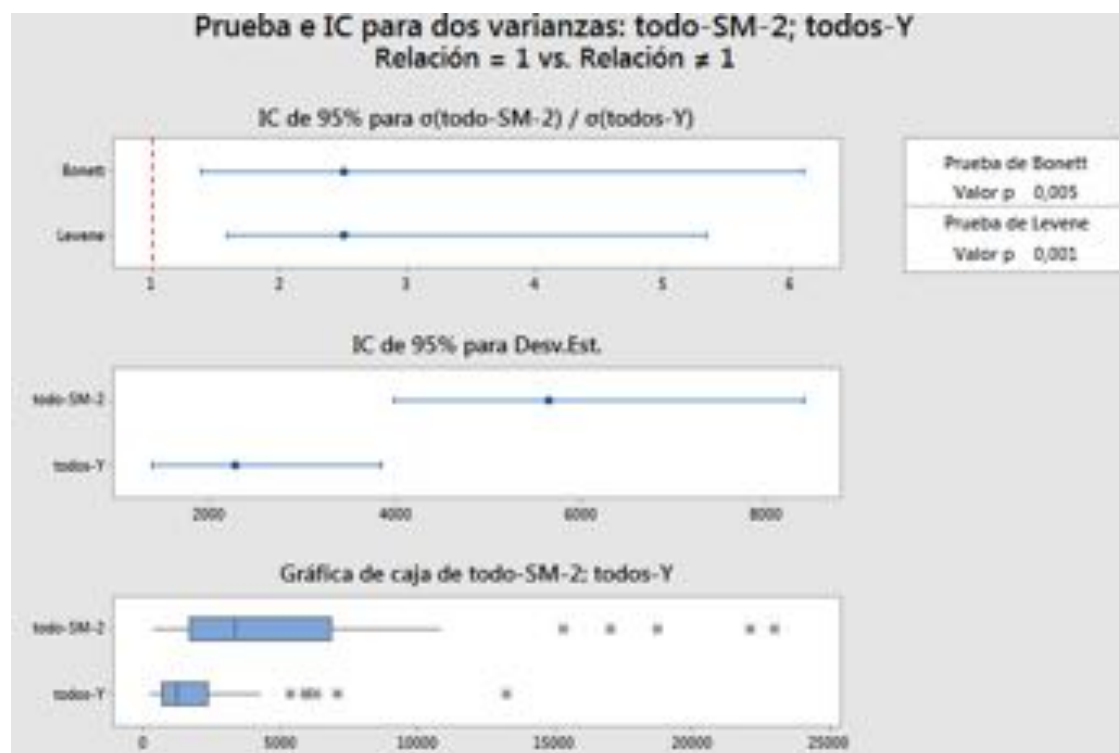


Figura 27. Prueba e IC para dos varianzas: SM y Y

El p-valor del contraste de medias poblacionales asumiendo varianzas distintas es muy cercano a 0 (Tabla 9), lo cual nos lleva a concluir que la contaminación es significativamente mayor en SM que en Y. Por lo tanto se deben implementar medidas correctoras con mucha más urgencia en SM.

Tabla 9. Prueba “T de dos muestras” para SM y Y

	N	ES Media	Desv. Est	Media
Todos-SM-2	46	5270	5655	834
Todos-Y	54	2066	2259	307
Diferencia = μ (todo-SM-2) - μ (todos-Y)				
Estimación de la diferencia: 3204				
IC de 95% para la diferencia: (1424; 4984)				
Prueba T de diferencia = 0 (vs. \neq): Valor T = 3,61 Valor p = 0,001 GL = 57				

Los resultados separados por año y cooperativa se muestran a continuación en la Tabla 10. Se puede apreciar que absolutamente todos los valores porcentuales superiores al valor de referencia de 1ppm superan el 50%, y en muchos casos también a las 2 ppm, sobretodo en Señor de Mayo (un 81% en 2014 y un 52% en 2015).

Una vez más, se demuestra que SM es la comunidad más precaria. Su planta de tratamiento es muy cercana a la comunidad por lo que los vapores de mercurio pueden ser inhalados con más facilidad por los habitantes de la población. Estas concentraciones de mercurio tan altas se encuentran no solo en los mineros, sino también en otros miembros de la comunidad, a pesar de que el consumo de pescado es muy bajo en esta área.

Tabla 10- Cantidad de valores en número y porcentaje superiores por muy encima de los máximos permitidos en las cooperativas Señor de Mayo, Yani, y Ingenio Limitado en 2014 y 2015

Cooperativa	N y % totales	2014		2015	
		VALOR > 2 ppm	VALOR > 1 ppm	VALOR > 2 ppm	VALOR > 1 ppm
SM	Total n	17	20	14	22
	Total %	81%	95%	52%	81%
	N	21		27	
Y	Total n	8	17	10	17
	Total %	28%	59%	40%	68%
	N	29		25	
IL	Total n	4	6	-	-
	Total %	44%	67%	-	-
	N	9		-	

En el histograma presentado anteriormente (Figura 25) podemos encontrar gráficamente la cantidad de concentración de mercurio según la cantidad de muestras, en SM y Y.

8.1.4 Análisis de medias poblacionales según el puesto de trabajo

Se ha realizado el test de contaminación según el puesto de trabajo independientemente del año y de la cooperativa minera. Para los trabajadores de planta se observa un p-valor inferior a 0,035 que nos indica que estos trabajadores reciben un mayor impacto contaminante (Tabla 11). Del mismo modo, los trabajadores de la sección de lavado muestran un nivel de contaminación muy encima del deseable. Obsérvese que en ambos casos las medias son muy elevadas, sin embargo, la alta dispersión hace que las pruebas realizadas no sean totalmente contundentes, es decir con un p-valor muy cercano a 0. Para el caso de la sección de lavado existe el problema que la muestra es muy reducida y está formada por solo 6 personas. Sin embargo la media de estas 6 personas es enorme y todo hace pensar que con una muestra mayor hubiéramos obtenido un p-valor cercano a 0.

Para las otras secciones hemos obtenido p-valores ligeramente superiores a 0,05 hasta un máxima de 0,30. Ello nos indica que a pesar que las medias observadas superan 2 ppm, no existe una evidencia para concluir que la realización de estas tareas implique un nivel de contaminación anormal. No obstante, es urgente aplicar medidas correctoras para los trabajadores tanto de la planta de procesamiento como de lavado.

Tabla 11. Arriba: Prueba “T de una muestra” Planta de procesamiento, abajo: T de una muestra Lavado.
Prueba de $\mu = 2000$ vs. > 2000

N	Media	Desv. Est	ESmedia	Límite inferior de 95%	T	P
21	4723	6474	1413	2286	1,93	0,034

N	Media	Desv. Est	ESmedia	Límite inferior de 95%	T	P
6	15068	17923	7317	324	1,79	0,067

La Tabla 12 muestra los niveles de concentración media de todas las muestras de los dos años, diferenciando por el tipo de trabajo además de los habitantes como niños y animales que habitan en las cooperativas. Se indica también el contacto con el mercurio que tienen, para determinar el nivel de exposición. Aparte de la contaminación propia del lugar de trabajo, estos datos sirven también para conocer la afectación del entorno y posibles otros modos de contaminación por mercurio.

Tabla 12. Concentraciones mercurio según cargo en la cooperativa (años 2014 y 2015).

Origen de la muestra	Número muestras	Concentración media Hg (ng/g)	Edad	Contacto con el mercurio
Trabajadores				
Almacenero	1	4680	62	Sí
Cocinera	2	4340	28	No
Minero	39	2105	39	A veces
Palista	1	6860	27	-
Planta procesamiento	21	4723	42	Sí
Bateador	6	15068	33	Sí
Socio	14	2288	41	A veces
Soldador	2	10000	30	A veces
Otros	4	6890	43	A veces
Habitantes cooperativa				
Niño	10	3213	4	-
Ama de casa	3	1298	28	-
Animales				
Oveja y llama	2	284	-	-
Perro	3	5170	3,1	-

Los valores medios muestran claramente que los dos trabajos con un riesgo mayor de contaminación por mercurio son los trabajos de lavado o plateado y en la planta de tratamiento (15 ppm y 4,7 ppm respectivamente), superando los niveles establecidos por la bibliografía. También contienen valores muy elevados los soldadores y los almaceneros. Estos trabajos son los que conllevan a contactar con el mercurio de forma habitual, en funciones como añadir mercurio en la pulpa de los molinos, estar en contacto con las mezclas de agua, mineral y mercurio, y carecen de elementos o equipos de protección. Por ejemplo, en las operaciones de lavado, hay muchas mujeres que suelen platear en el río sin llevar guantes, que es la mínima protección. De la misma manera ocurre con las operaciones en la planta de tratamiento.

Seguidamente podemos encontrar niveles altos de mercurio en los palistas y otros los cuales incluyen un comerciante, un conductor de volqueta, un mecánico industrial y un vocal de vigilancia. Los trabajos de los socios son de control de las operaciones en la planta de tratamiento y mina. Los trabajadores dentro de mina muestran un nivel más alto de lo habitual en ambientes no contaminados (Kempson y Lombi, 2011), pero dentro de un nivel tolerable excepto en la muestra SM7. Al no estar en contacto directo con el mercurio, su contaminación se puede deber a la inhalación de partículas transportadas por el viento procedente del mineral vertido en el río o de la alimentación procedente de los alrededores.

Por otro lado, se ve claramente que los habitantes de las cooperativas y el entorno se ven afectados por el uso del mercurio, en aquellas operaciones de pulpa y quema de la amalgama, donde se escapa el vapor de mercurio. Aunque no presenten valores muy elevados, vemos que los niños ya contienen un nivel de mercurio más alto de lo que deberían, con sólo 4 años de edad. Igualmente, en los perros muestran una gran concentración de mercurio excediendo los 2 ppm de límite tolerable. Finalmente, los tres perros analizados contienen de media unas 5 ppm de mercurio, por lo que superan mucho los límites tolerables. Por suerte, la oveja y la llama no presentan cantidades de mercurio preocupantes, por lo que en éste aspecto, los habitantes del pueblo no son perjudicados por los alimentos provenientes éstos animales. Si fuera al revés, podría suponer un problema ya que los animales de campo, en especial las llamas, son reducidos en cantidad por las condiciones climáticas y geográficas.

8.1.5 Análisis de contaminación en habitantes de la zona alieno al trabajo minero: niños

Hemos realizado también el estudio habitual de contaminación en niños que habitan en las zonas estudiadas. Estos niños con una media de edad de 4 años y una desviación de 1 año ya presentan niveles de contaminación preocupantes a pesar de mantenerse alejados de las minas. Sin embargo, se mueven en el entorno de estas zonas. Observamos un p-valor de 0,10 ya muy cercano a 0,05, que nos permite concluir que el nivel de exposición al mercurio es ya excesivamente elevado (Tabla 13). Si hubiéramos dispuesto de una muestra algo mayor quizás el p-valor sería inferior a 0,05. En definitiva, a pesar de la corta edad de los niños observados el nivel de contaminación que presentan es también preocupante.

Las medidas correctoras que deberían aplicarse en los puestos de trabajo potencialmente podrían ayudar a disminuir también el nivel de mercurio en entornos cercanos.

Tabla 13. Prueba T de una muestra Niños; $\mu = 2000$ vs. > 2000 . Valores de mercurio (ng/g).

N	Media	Desv. Est	ESmedia	Límite inferior de 95%	T	P
10	3213	2793	883	1594	1,37	0,101

8.1.6 Otros factores

Los valores que superaron los 6 ppm en 2015 fueron lavados (denominación terminada con L) . Los resultados enseñan que la concentración de mercurio tiende a bajar pero no en todos los casos ni considerablemente. Incluso en un caso, se encontró el mismo mercurio SM2-12 = 17 ppm y SM2-12L = 18,3ppm. El resto bajan de un 10 a un 46 % de su valor inicial, en concreto

una variación del 32% de media. Por lo tanto, en algunos casos una parte del mercurio detectado puede ser a causa de suciedad pegada en el cabello, pero aun así, los niveles de concentración son muy altos, y demuestran que los contienen a largo plazo.

Sin embargo, no se pueden extraer conclusiones de algunos factores contemplados como posibles influyentes en la concentración del mercurio. Concretamente, no se ha podido analizar la afectación en base a los diferentes sexos, ya que no hay trabajadoras mineras, sólo hacen trabajos de platear. El consumo de pescado tampoco es relevante en este caso, ya que se obtiene de otros lugares. Por otro lado, el consumo de tabaco y alcohol no han mostrado ningún patrón evidente.

8.2 Sedimentos y agua

La contaminación de mercurio en el agua del río Yani varia de un 0,12 hasta un 0,22 $\mu\text{g/g}$ Hg y del agua que usan para beber alrededor de 0,22 ng/g Hg, ambos inferiores a los límites indicados por WHO (Tabla 14). Aunque los resultados indican que las aguas no están contaminadas, no podemos descartar que realmente no lo estén, porque el mercurio procedente de los procesos de extracción del oro es el mercurio metálico Hg_0 , y por lo tanto, no es el que genera más peligrosidad. Al cabo de cierto tiempo, puede ser que éste mercurio sea transformado en metilmercurio y entonces se puede encontrar muestras de contaminación. Se debe entonces, volver a tomar muestras para tener unos resultados más fiables. Igualmente, se puede ver como el agua no tiene una presencia buena (Figura 28), ya que aunque no haya salido concentraciones de mercurio puede contener otros metales.

Tabla 14. Concentración de mercurio en el agua

Muestra	Descripción	Concentración Hg dis, ($\mu\text{g/l}$)	Concentración Hg Total($\mu\text{g/l}$)
SM-2-1	Agua del río antes de la planta	0,0019	0,12
SM2-2	Agua del río después de la planta	<LD	0,26
SM2-6	Suministro de agua de la población (2015)	0,0026	0,22
SM1-7	Suministro de agua de la población (2014)	0,0080	0,18
Y2-1	Agua del río antes de la planta	<LD	0,12



Figura 28. Agua después de la planta de tratamiento.

Por otra parte, el nivel de concentración en los sedimentos recolectados del río cerca de la planta de procesamiento de Señor de Mayo y Yani sí muestra unas concentraciones de mercurio elevadas, de 2,4 y 5,9 ug/g respectivamente, las cuales presentan un severo riesgo ambiental (Tabla 15, y Figura 29).

Tabla 15. Concentraciones de mercurio en la salida del molino y en la zona de descargas

Muestra	Descripción	C, ng/g
SM2-2 (barro)	Sedimento en la salida del molino	5920
SM2-3	Sedimento en la salida del molino	2400
SM2-1 (barro)	Sedimento del río en la zona de descargas	12600
SM2-2	Sedimento del río a 100 metros de la zona de descargas	17100
Y2-2	Sedimento en la salida del molino	3620
Y2-2 (barro)	Sedimento del río en la zona de descargas	10900

La concentración de mercurio en los sedimentos del río Yani en las zonas de descarga es considerablemente más elevado que en la salida del molino. Esto se debe a que en ésta zona se concentran mujeres que realizan el plateado o lavado de los sedimentos que llegan de la planta de procesamiento, para aprovechar el residuo. Utilizan mercurio para obtener la amalgama mercurio-oro para luego recuperar el oro quemándolo en la retorta.



Figura 29. Contaminación de los sedimentos y barro del río Yani cerca de las operaciones mineras

8.3 Vegetación

En la vegetación también se encuentran importantes concentraciones de mercurio (Tabla 16). La flora absorbe éstas cantidades de mercurio presentando un gran impacto ambiental. Las zonas que presentan un peor estado son a la salida de la planta de procesamiento. Por lo tanto, es necesario que se revisen todas las operaciones en la planta de procesamiento y uso del mercurio, para evitar al máximo posible la contaminación de la vegetación.

Tabla 16. Concentración de mercurio en la vegetación de la zona analizada.

Muestra	Hg, ng/g
1Ret L7AH	19070
2Ret R7Q2(i)	19810
2Ret R7Q2(ii)	35590
2Ret R7Q2(iii)	26360
3 Cit L7AH (i)	5740,25
3 Cit L7AH (ii)	27687,5
3 Cit L7AH (iii)	16472,5
4 Cit Cy-1 (i)	21460
4 Cit Cy-1 (ii)	15768
5 Col Co-1 (i) fine	6322,5
5 Col Co-1 (ii)	14437,5

9. PROPUESTAS DE RECUPERACIÓN DEL MERCURIO Y MÉTODOS ALTERNATIVOS DE PROCESAMIENTO DEL ORO

Hemos visto que en las cooperativas estudiadas existe una alta contaminación de mercurio, y además su uso no es el máximo eficiente posible, por lo que se pierde grandes beneficios. Las tres cooperativas, aunque a distintos grados, necesitan implementar métodos alternativos al actual para recuperar el máximo de oro con el mínimo de contaminación posible.

A continuación se expondrán primeramente, propuestas de recuperación del mercurio, consejos, buenas practicas y uso de las máquinas utilizadas, y seguidamente métodos alternativos de procesamiento del oro sin usar mercurio, lo que supondría un cambio radical en la forma de trabajar de estas cooperativas.

Además, uno de los problemas que sufren la minería a pequeña escala es que incluso el mercurio que se recupera, no es aprovechado completamente, ya que su capacidad de amalgamación ha disminuido. Es por eso que el mercurio recuperado debe ser limpiado debidamente, para recuperar al máximo sus propiedades. Se puede limpiar de distintas formas (UPME, 2011):

- Pasando el mercurio a través de una tela fina
- Lavando el mercurio con cenizas de madera y agua
- Lavando el mercurio en agua con detergente
- Destilando el mercurio en una retorta o en un depurador en seco.

Igualmente, el objetivo final debe ser la sustitución completa del mercurio, por otro proceso que pueda recuperar el oro, sin los problemas de contaminación de genera. El sello de certificación del Comercio Justo tiene el requisito de seguir implementando medidas correctoras hasta erradicar del todo el uso del mercurio, por lo que las mejoras de extracción con el uso de mercurio sólo bastarían en las primeras fases de evolución.

9.1 Propuestas de recuperación del mercurio y extracción del oro

9.1.1 Mejoras en la extracción dentro de la mina

Primero de todo, se debe hacer un estudio geológico detallado para diferenciar aquellas estructuras (vetas o mantos) que contienen oro de las que no lo contienen, de ese modo se evitara pérdidas de mineral. En los casos estudiados, los yacimientos se encuentran en los

tres casos se ha visto que el oro se concentra únicamente en determinadas unidades, en cambio, se explotan todas. Las que se formaron tardíamente son las que presentan una mayor probabilidad de contener oro.

Hace falta un planeamiento minero y topografía que permita diseñar los métodos de explotación y sistemas de desagüe, ventilación, transporte y otros para así poder obtener una mayor eficiencia productiva.

9.1.2 Mejoras en la trituración y amalgamación

En las regiones estudiadas, vierten el material directamente en los molinos de bolas, donde añaden mercurio y agua. Para que el material que salga sea el más fino posible para poder concentrarlo mejor, se necesita que las partículas tengan un tamaño pequeño. Esto se consigue utilizando tamices para separar el material (proceso sencillo y barato) y que puede mejorar la recuperación, y antes con el uso de una trituradora de mandíbulas. Se considera que la molienda es efectiva cuando el tamaño de grano es menor de 0,5 mm (malla 35); aunque mayoritariamente se encuentran tamaños de hasta 2 mm (malla 10) (UNEP, 2012).

El mercurio se debería añadir en la cantidad mínima necesaria. Su exceso contribuirá a su atomización y pérdida como harina de mercurio. Igualmente, tampoco se puede exceder en el tiempo de amalgamación, que trituraría el oro y se perdería (UPME, 2007).

No obstante, el desafío más grande es reemplazar la actual amalgamación en circuito abierto por circuitos cerrados. El molino trabaja como un clasificador cuyo producto grueso retorna de nuevo al molino mientras que el fino pasa directamente a la etapa siguiente, por lo que su recuperación es más eficiente y menos contaminante en prevenir la pérdida de harina de mercurio. Cambiar la infraestructura de la planta de procesamiento así como la compra de nuevos equipos, también puede ser costoso aunque se verían resultados de inmediato.

9.1.3 Mejoras en la concentración

En este apartado se darán consejos, pues ya se están utilizando equipos de concentración que ayudan a recuperar las colas de amalgamación, como las canaletas y las mesas concentradoras. Es aconsejable usar canaletas con piso de alfombra sin rejillas o trampas, para hacer que la pulpa fluye con poca turbulencia dando resultados de recuperación de oro mejores. Además, se debe tratar cada tamaño en su canaleta respectiva.

Sin embargo, se seguirían produciendo una gran cantidad de colas, el almacenamiento de las cuales presenta gran dificultad. Una posibilidad podría ser depositarlas apropiadamente para un futura reaprovechamiento, construyendo depósitos seguros con revestimientos de HDPE o arcillas impermeables, las cuales se ha comprobado que existen en la zona. Deben construirse en lugares donde no puedan estar en contacto con aguas subterráneas, alejadas del río y protegerlos contra el arrastre de lluvias y viento. El problema es su alto coste, por el que en una minería a pequeña escala es difícil de implementar. Por el momento, se han visto algunas balsas de almacenamientos de lodos (Figura 30) al terminar el proceso en la planta de procesamiento, pero son insuficientes e inadecuadas ya que se rebosan y se filtran en las aguas y vegetación cercana.



Figura 30. Balsas de almacenamiento del lodo.

9.1.4 Mejoras en la refinación

Consejos para el uso de la retorta

Visto que en las regiones estudiadas ya se utiliza la retorta para separar el oro y mercurio amalgamados, se darán consejos para un mejor uso y una menor exposición al vapor de mercurio.

Es muy importante que se realice en un lugar aislado con buena ventilación o extractor, en una buena retorta (con una área de condensación pequeña, tubo liso y cierre hermético) y el minero que la use protegido con vestimenta adecuada, guantes y sobretodo mascarar respiradoras. Los niños y mujeres embarazadas no deben estar cerca ni operar una retorta. Se

deben seguir bien las indicaciones porque sino se puede perder oro, además que aumenta la contaminación de mercurio. Los pasos a seguir para su puesta en operación son los siguientes:

- 1- Encender el motor para accionar el extractor de aire. Previamente se tiene que mirar que haya aceite suficiente y luego dejar que el motor se caliente. Se deben hacer tareas de mantenimiento para asegurar su buen funcionamiento.
- 2- Colocar la amalgama en el cucharón de refogado e introducir a 5 centímetros de la puerta de la cámara de combustión
- 3- Encender el soplete para iniciar el quemado de la amalgama
- 4- Calentar de forma gradual cuando se refoga.
- 5- Esperar 30 segundos que termine el proceso de quemado y apagar el motor para eliminar el vapor de mercurio en la cámara de quemado
- 6- Recolectar el oro del cucharón de refogado.

Incluso, se podría añadir una capa de cal al interior del crisol o cucharón para obtener mejores resultados.

Depurador en seco de mercurio

El depurador en seco de mercurio tiene una recuperación aproximadamente de un 98% según la UPME (2011). El procedimiento se inicia en el cubículo quemador de amalgama, donde se evapora el mercurio y se funde y separa el oro amalgamado. El mercurio evaporado se va por un codo de salida y es transportado hacia el condensador de mercurio primario, donde circula formando remolinos y así condensarse y precipitar al fondo del condensador, donde caen en los recolectores de mercurio condensado.

La parte buena que tiene este proceso es que la pequeña proporción de mercurio que no es condensada no se desecha, sino que pasa por un condensador secundario gracias a los disipadores de calor, los cuales bajan la temperatura notablemente para hacer que el aire circule ágilmente. También se dispone de extractores en los cubículos que absorben los vapores de mercurio y los conducen hacia el circuito cerrado de depuradora haciéndolos pasar por unas felpas que absorban el material contaminante como las cenizas, humo u otros metales.

El circuito del equipo de depuración pasaría por las siguientes partes: Quemador, condensador primario, disipador de calor, condensador secundario, retenedor de cenizas de Hg, cartucho depurador, segundo cartucho recuperador y tubo de escape y tubo de retorno del aire.

El depurador en seco de mercurio es un método seguro, fácil y muy eficiente para la minería a pequeña escala. El circuito cerrado permite un reaprovechamiento de prácticamente todo el mercurio utilizado, y una absorción de contaminantes.

9.2. Procesos sin usar el mercurio. Uso del Bórax

El método de bórax es una buena técnica como alternativa al mercurio para recuperar el oro, fácil y rápido de aprender. El bórax no es tóxico, es barato y es fácil de obtener en la mayoría de poblaciones. El punto de fusión del oro es muy elevado, a una temperatura de 1064°C, por lo tanto es muy difícil de llegar a ella por medio de quemadores de bajo costo. Con la ayuda del bórax, la temperatura de muchos minerales y metales como el oro bajan considerablemente. Además, el oro que se obtiene es más limpio, y se podrá vender a un mejor precio, a diferencia del uso del mercurio que pueden quedar restos de amalgama. (Agenda, 2010). El equipamiento que se necesita para utilizar el método de bórax es fácil de obtener: bórax, bol de cerámica, carbón de leña, bolsa de plástico y un soplete.

Previamente, se vierte el material en el molino de bolas sin poner mercurio. El material que sale mezclado con agua, debe pasar por una canaleta con una alfombra cuyo filtro atrapa los metales pesados como el oro, hierro, cobre o plata. Seguidamente se recoge el material filtrado, y se vierte en un cubo con jabón para llevar el oro hacia el fondo del contenedor y evitar perderlo. Ahora empieza el proceso de lavado donde usaremos un imante para quitar el hierro, y las manos para aplanar las partículas y hacerlas más finas y así encontrar finalmente el oro. (<http://www.compujose.com>, 2016).

A partir de aquí entra la etapa del bórax. El concentrado de mineral que hemos encontrado después de la operación del lavado se mezcla con la misma cantidad o tres veces más de polvo de bórax. El concentrado de mineral pesado bórax se mezcla a fondo en una pequeña bolsa de plástico, y se le añaden unas gotas de agua. La bolsa de plástico se coloca en un recipiente de cerámica, junto con unos trozos de carbón y se calienta mediante un soplete.

Seguidamente, la bolsa de plástico es calentada por una denominada lámpara de soldar que es funciona con gasolina. Después de unos minutos se funde el bórax y el calentamiento adicional de unos minutos se derrite el oro en el concentrado de mineral pesado. Todos los demás minerales pesados se separan del oro fundido. Finalmente, detiene el calentamiento y el oro se puede quitar después de unos minutos con la punta de un cuchillo.

El bórax funciona mejor en concentrados de minerales de oro de fresado particularmente libre, mientras que se ve obstaculizada por la presencia de azufre como es el caso de oro

refractario que requiere la oxidación del mineral antes de proceso de recuperación (Agenda, 2010).

Es un método de bórax es limpio, y no daña el medioambiente como lo hace el mercurio, por lo que podría ser una buena alternativa para sustituir el mercurio en las minas artesanales de Bolivia, como las estudiadas. Este método ya se está utilizando en varias minas de oro a pequeña escala en el mundo como en Tanzania, aunque puede ser difícil de implementarlo de cero, ya que normalmente los pequeños mineros son reticentes a los cambios. La manera más eficaz de facilitar conocimientos se basa en ejemplos prácticos y tangibles.

El precio del boro en Bolivia no debería de suponer un problema, ya que tienen grandes reservas en el Salar de Uyuni, por lo que podrían obtener el boro de forma fácil y económica.

10. FUTUROS TRABAJOS Y POSIBLES MEJORAS

Para fortalecer los resultados obtenidos sobre la contaminación del mercurio, se deberían planificar más análisis de cabellos durante los siguientes años, y también combinarlo con análisis de otros biomarcadores como la orina o la sangre. El próximo Julio de 2016 se volverán a tomar muestras y se continuará el estudio para ver su evolución.

En los próximos años también está previsto hacer un estudio geotécnico de las minas de las zonas estudiadas, para evitar procesar mineral donde no haya oro, y mejorar la infraestructura de la mina.

El presente trabajo se ha centrado sobretodo en determinar la exposición y concentración de mercurio en las personas y medioambiente. Es por eso que otra posible mejora podría enfocarse en el punto de vista más bien del procesamiento del oro, entrando en detalle en la sustitución o mejora de equipos utilizados en cada una de las plantas de tratamiento de las tres cooperativas, introduciendo aspectos económicos para ver la viabilidad de cada una de las propuestas. La seguridad también es un tema fundamental el cual debe ser mejorado, tanto dentro de la mina como en los Ingenios.

11. CONCLUSIONES

En este trabajo se han podido conseguir los objetivos iniciales previamente señalados.

En primer lugar, se ha podido realizar una valoración sobre los niveles de contaminación por mercurio en las tres cooperativas mineras estudiadas en Bolivia, tanto en la salud de las personas, como en el medioambiente.

Respecto a la salud de las personas, las muestras de cabellos han constatado una gran contaminación de mercurio en los habitantes de las tres cooperativas y concretamente podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Un análisis global nos permite ver que los niveles de contaminación superan el umbral de 2 ppm establecido por la WHO.
- Aunque no existen diferencias significativas entre los niveles de contaminación entre 2014 y 2015, en ambos casos las concentraciones siguen siendo muy elevadas.
- Señor de Mayo es la cooperativa más contaminada y que por lo tanto, necesita considerarse prioritaria en el orden de aplicación de medidas correctoras.
- Según el puesto de trabajo, los trabajadores de lavado y los de la planta de procesamiento, son los que presentan un nivel de contaminación por mercurio más elevados.
- No sólo los trabajadores son vulnerables a la contaminación, sino que los habitantes que residen en el campamento también se ven afectados por el vapor de mercurio, el cuál es inhalado. Los niños presentan ya de muy pequeños grandes cantidades de mercurio en su organismo.
- Las muestras lavadas presentan una concentración inferior pero no de forma considerable, por lo que se demuestra que el mercurio que contiene el cabello perdura a largo plazo.

Los cabellos pues, son una buena alternativa a los métodos tradicionales de captación localizada y análisis de orina y sangre, ya que permiten una visión a medio y largo plazo de la exposición de los trabajadores al mercurio. Una combinación con los métodos ortodoxos daría más fortaleza a los resultados obtenidos.

En cuanto la contaminación del medioambiente, se ha comprobado que las plantas, sedimentos y animales de la zona también se ven afectados por el mercurio orgánico o metilmercurio. Aunque los resultados de las aguas no dan lugar a una gran amenaza para el

medioambiente y salud, los sedimentos muestran unas concentraciones de mercurio elevadas. Los sedimentos del río Yani en la zona de descarga contienen concentraciones mayores que en las de la salida del molino, ya que en las primeras se concentran las operaciones de lavado. Además se ha visto que las plantas o vegetación que presentaban un peor estado eran en la salida de la planta de procesamiento.

Seguidamente, a partir de un análisis sobre las tareas de extracción y procesamiento del oro actual, se han propuesto medidas alternativas que pueden ayudar a obtener un mayor beneficio y una disminución en la contaminación en estas cooperativas. Se debe realizar un estudio geográfico y una planificación de la extracción de mineral en la mina, y mejorar las técnicas de procesamiento. Se debería implementar un circuito cerrado para evitar verter el mercurio directamente al río, y mejorar el uso y manejo de los equipos como el molino de bolas, las canaletas, mesas concentradoras o retortas. Ésta última podría ser sustituida por un depurador en seco de mercurio, mucho más eficaz y limpio. A parte, se debe gestionar el desecho en almacenes debidamente protegidos.

Asimismo, se puede considerar para el método de Bórax, el cual permite la eliminación completa del uso del mercurio, es fácil y rápido de aprender y no necesita grandes costos para ser aplicado. Es una buena alternativa que supondría una mejora sustancial en la salud y contaminación de las personas y del medio ambiente.

Finalmente, se ha podido valorar el contexto social de las cooperativas, las cuales aún presentan problemas de discriminación de la mujer, desorganización social, baja seguridad en el trabajo, bajos ingresos que dificultan la mejora en sus procesos técnicos y la poca consciencia respecto al medioambiente y su salud. Por esto, en estas zonas es necesario hacer un plan de mejora durante años consecutivos para poder introducir medidas correctoras a medida que van tomando conciencia de la importancia que tiene, y conseguir un comercio justo y beneficioso para todos.

BIBLIOGRAFIA

- Agenda. Environmental and Responsible Development (2010). Training of trainers on alternatives of mercury and best available techniques (BATs) and best environmental practices (BEPs) in artisanal and small scale mining in Tanzania (phase III). Pp 5. http://www.zeromercury.org/phocadownload/Whats_on_in_the_regions/AGENDA_A_SGM_short_proposal_paper_5Feb2010.pdf.
- Ahlfeld, F., Schneider-Scherbina A., (1964). Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia. *Ministerio de Minas y Petróleo, Dep. Nacional de Geología*, 5. Pp 388.
- Amezaga J.M., Rötting T.S., Younger O.P.L., (2011). A rich vein? Mining and the pursuit of sustainability. *Environ. Sci. Technol*, 45, 21-26.
- Arce-Burgos O. R., Goldfarb R. J. (2009). Metallogeny of Bolivia. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 79, 8-15.
- Ashe, K. (2012). Elevated mercury concentrations in humans of Madre de Dios. *PLoS ONE*, Perú, 7(3), e33305.
- Castilhos Z., Rodrigues-Filho S., Cesar R., Rodrigues A. P., Villas-Bôas R., de Jesus I., Lima M., Faial K., Miranda A., Brabo E., Beinhoff C., Santos E. (2015). Human exposure and risk assessment associated with mercury contamination in artisanal gold mining areas in the Brazilian Amazon. *Environ Sci Pollut Res*, 22, 11255-11264.
- Cordy. P., Veiga M. M., Salih I., Al-Saadi, Console S., Garcia O., Mesa L.A., Velásquez-López P.C., Roeser M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Tot Environ*, 410-411, 154-160.
- Díez S., Esbrí J.M, Tobias A., Higuera P., Martínez-Coronado A. (2011). Determinants of exposure to mercury in hair from inhabitants of the largest mercury mine in the world. *Chemosphere*, 84, 571-577.
- Directiva 2009/161/UE Comisión 17 de Diciembre de 2009. Lista de valores límite de exposición profesional del mercurio, *INSHT*.
- Eisler, R. (2003). Health risks of gold miners: a synoptic review. *Environmental Geochemistry and Health*, 25, 325-345.

- EPA. (1997). Mercury Study Report to Congress, volumen III, Fate and Report of Mercury in the Environment.
- Guimarães Davee, J. R., Roulet, M., Lucotte, M., Mergler, D. (2000). Mercury methylation along a lake in the Tapajos, Brazilian Amazon : seasonal and vertical variations. *Science Tot environ*, 261, 91-98.
- Gul. N., Khan S., Khan A., Saeed Ahmad S. (2015). Mercury health effects among the workers extracting gold from carpets and dusted clays through amalgamation and roasting processes. *Environ Sci Pollut Res*, 22, 17965-17974.
- Haeberlin, Y., Moritz, R., Fontboté, L. (2003). Paleozoic orogenic gold deposits in the eastern Central Andes and its foreland, South America. *Ore Geology Reviews*, 22, 41-59.
- Hagan N., Robins N., Hsu-Kim H., Halabi S., Gonzales R. D. E., Ecos E., Richter D., Vandenberg J. (2014). Mercury hair levels and factors that influence exposure for residents of Huancavelica, Peru. *Environ Geochem Health*, 37, 507-514.
- Hentschel T., Hruschka F., Priestar M., (2003). Artisanal and small-scale mining. *International Institute for Environment and Development and WBSCSD*. ISBN 1 84369 470 0.
- Kempson I. M., Lombi E. (2011). Hair analysis as a biomonitor for toxicology, disease and health status. *Chem Soc Rev*, 40, 3915-3940.
- Ministerio de Salud y Deportes de Bolivia, INSO, OPS/OMS. Protocolo de vigilancia y control de poblaciones expuestas a mercurio. La Paz, Bolivia.
- Muñoz M. A., Faz A., Acosta J.A., Martínez-Martínez S., Arocena J.M. (2013). Metal content and environmental risk assessment around high-altitude mine sites. *Environ Earth Sci*, 69, 141-149
- Olivero J., Solano B. (1998). Mercury in environmental samples from a waterbody contaminated by gold mining in Colombia, South America. *Sci Tot Enviorn*, 217, 83-89.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS), (2011). Cooperación técnica entre Brasil, Bolivia y Colombia: Teoría i práctica para el fortalecimiento de la vigilancia de la salud de poblaciones expuestas a mercurio.

- Poulin J., Gibb H.,(2008). Mercurio: Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local. Editora, Prüss-Üstün A. *Organización Mundial de la Salud, OMS, Serie Carga de Morbilidad Ambiental*, nº 16.
- RCS Global (2016). State gold-buying programmes: Effective instruments to reform the artisanal and small-scale gold mining sector?. IIED, Londres. Ver <http://pubs.iied.org/16610IIED>, pp 40.
- Seccatore J., Veiga M., Origliasso C., Marin T., De Tomi G., (2014). An estimation of the artisanal small-scale production of gold in the world. *Sci Tot Environ*, 496, 662-667.
- Telmer K., Stapper D. (2012). Guía Práctica. Reducción del uso de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA*.
- Terán-Mita, T., Faz, A., Salvador, F., Arocena, J. M., Acosta, J. (2013). High altitude artisanal small-scale gold mines are hot spots for Mercury in soils and plants. *Environ Poll*, 173, 103-109.
- Universidad de Alcalá. Bioquímica ambiental. Contaminación por Metales. http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/T11-metales.pdf
- UNEP- United Nations Environment Programme (2008). Mercury. A priority for action.
- UPME - Unidad de planeación Minero Energética (2007). Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Mercurio, cianuro y otras sustancias. República de Colombia. ISBN: 978-958-98138-7-4.
- Varios (2002). Abriendo Brecha. Minería artesanal y en pequeña escala. *International Institute for Environment and Development IIED*, Capítulo 13. 430-459. IIED code: G00687
- Veiga M. M., Angeloci G., Hitch M., Velasquez-Lopez P. C. (2014). *Processing centres in artisanal gold mining*. Journal of Cleaner Production, 64, 535-544.
- World Health Organization (WHO) (2007). Exposure to mercury. *Public health and environment*, 1-4.
- World Health Organization (WHO) (2008). Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure, *IOMC, UNEP*.
- World Health Organization (WHO) (2010). Mercury in drinking-water.

Wotruba H., Hruschka F., Hentschel T., Priester M. (2000), Manejo ambiental en la pequeña minería. *MEDMIN_COSUDE*.

Reglamento UE nº 847/2012 de la Comisión Europea, de 19 septiembre de 2012. BOE. Diario Oficial de la Unión Europea

<http://comerciojusto.org> (Consultado el día 20/03/2016)

<http://elementos.org.es/mercurio> (Consultado el día 07/04/2016)

<http://www.fairmined.org> (Consultado el día 20/03/2016)

<http://www.mercuriados.org> (Consultado el día 12/04/2016)

ANEXOS

Tabla 1. Países con mayor producción de mercurio años 2001-2014. (British Geological Survey)

Production of mercury					Kilograms
Country	2010	2011	2012	2013	2014
Finland	9 000	5 000	—	—	—
Russia	* 50 000	* 50 000	* 50 000	* 50 000	* 50 000
Morocco	* 20 000	* 20 000	* 20 000	* 20 000	* 20 000
Mexico (a)	* 11 000	* 120 300	* 235 300	* 298 200	* 300 900
USA	* 15 000	* 15 000	* 15 000	* 15 000	* 15 000
Argentina	32 000	31 000	37 000	28 000	* 25 000
Chile (b)	* 176 000	(a)* 89 200	(a)* 48 600	(a)* 19 300	* 20 000
China	1 585 000	1 493 000	1 347 000	1 822 000	2 280 000
Kyrgyzstan	99 000	112 000	74 000	* 75 000	48 000
Tajikistan	88 000	100 000	103 000	130 000	* 130 000
World total	2 100 000	2 000 000	1 900 000	2 400 000	2 900 000

Country	2005	2006	2007	2008	2009
Finland	34 200	22 820	45 195	33 120	6 210
Russia	* 50 000	* 50 000	* 50 000	* 50 000	* 50 000
Algeria	300	—	—	—	—
Morocco	14 800	18 800	17 900	17 400	* 18 000
Mexico	* 6 000	* 8 000	21 355	58 482	36 696
USA	* 15 000	* 15 000	* 15 000	* 15 000	* 15 000
Argentina	—	—	3 483	1 027	9 488
Chile (a)	* 50 000	* 50 000	* 50 000	* 50 000	* 50 000
China	1 094 000	760 000	798 000	1 333 000	1 300 000
Kyrgyzstan	304 000	* 250 000	* 250 000	* 250 000	* 250 000
Tajikistan	* 30 000	* 30 000	—	—	—
World Total	1 600 000	1 200 000	1 300 000	1 800 000	1 700 000

Country	2001	2002	2003	2004	2005
Finland	71 200	50 600	25 000	23 500	34 200
Russia	*50 000	*50 000	*50 000	*50 000	*50 000
Spain	524 000	728 139	745 260	—	—
Algeria	320 091	307 119	175 570	67 200	300
Morocco	*10 000	*10 000	*10 000	*10 000	*10 000
Mexico	*15 000	*15 000	*15 000	*15 000	*15 000
USA	*15 000	*15 000	*15 000	*15 000	*15 000
Chile (a)	*37 400	*50 000	*50 000	*50 000	*50 000
China	193 000	495 000	612 000	1 140 000	1 150 000
Kyrgyzstan	574 400	478 000	370 000	488 100	*500 000
Tajikistan	*40 000	*20 000	*30 000	*30 000	*30 000
World Total	1 900 000	2 200 000	2 100 000	1 900 000	1 900 000

Pauta de buenas prácticas para el mercurio. NTP 184, del INSHT (España)

Tabla 2: Valores límites ambientales del mercurio

	E.E.U.U. (ACGIH) (16) TLV/TWA 85-87 mg/m ³	R.F.A. (16) MAK 85 mg/m ³	URSS (17) Norma GOST 88 mg/m ³	SUECIA (17) LLV 85 mg/m ³
Mercurio	0,05 * **	0,1	0,01 0,005 (Valor promedio para un puesto de trabajo)	0,05
Mercurio compuestos orgánicos	0,01 (Compuestos alquílicos) 0,03 (Compuestos alquílicos, valor STEL) 0,1 (Compuestos arílicos)	0,01	0,005 (Dietilmercurio) 0,005 (Cloruro de etilmercurio) 0,005 (Fosfato de etilmercurio)	0,05 0,01 (Compuestos alquílicos)
Mercurio compuestos inorgánicos	0,1		0,2 (Cloruro mercuríico) 0,2 0,05 (Valor promedio para un puesto de trabajo)	0,05
Nota: Todos son valores promedio, excepto los valores de la URSS que son valores techo. * ACGIH (1) 0,05 mg/m ³ ** OSHA (13) 0,1 mg/m ³				

Tabla 3: Valores límites biológicos para el mercurio

	SANGRE	ORINA
	µg Hg/100 ml sangre	µg Hg/100 orina
E.E.U.U. (ACGIH) BEI, 1995/7 (15)	En estudio	En estudio
R.F.A. BAT-Werte, 1996 (16)	5 (Mercurio metálico y compuestos inorgánicos) 10 (Compuestos orgánicos)	200 (Mercurio metálico y compuestos inorgánicos)
O.M.S., 1980 (8)	---	50 µg/g creatinina
Baselt, 1980 (3)	3	50 a 100
Lauwerys, 1982 (10)	3	50 µg/g creatinina
Górriz, 1985 (14)	Establece 3 niveles: 3 Impregnación 3 a 6 ... Control Activo 6 Separación puesto de trabajo	---

Tabla 4. Resultados Señor de Mayo año 2015

Descripción	C, ng/g	% RSD	Nombre	Sexo	Edad	Cargo	Contacto con Hg	Consumo pescado	Elementos de protección	Tiempo en la mina	Alcohol	Tabaco
SM1	48.400	17,1	Valentina Flores	F	51	Lavado						
SM2	18.700	11,6	Marcia Mani	F	27	Lavado						
SM3	15.300	17,0	Alberto López	M	37	Lavado						
SM4	4.420	12,1	Francisco Mamani	M	51	Planta	si	si	no	2011	no	no
SM5	6.860	8,0	Freddy Julio	M	27	Palista	no	si	-	2012	si	no
SM6	136.000	18,0	Julián Payo	M	58	Planta	si	si	no	1994	no	no
SM7	10.800	7,1	Rodrigo Mamani	M	25	Minero	si	si	no	2011	si	si
SM8	2.360	10,0	Roberto Castillo	M	26	Molino						
SM9	3.250	7,4	Jorge López	M	62	Minero						
SM10	23.000	13,3	Luís Ricaldi	M	45	Quemador						
SM11	5.760	19,0	Sixto Bonilla	M	60	Socio	si	si	no	1990	no	no
SM12	1.780	11,5	Elema Laso	F	31	Ama de casa						
SM13	1.590	21,3	Julián Momani	M	29	Minero						
SM14	3.880	8,4	Rogelio Mayta Alan	M	28	Minero						

SM15	394	2,0	José Alanoça	M	26	Minero
SM16	1.540	14,2	Fabiola Mamani	F	23	Ama de casa
SM17	7.040	15,6	Anchi Salcedo	F	2,5	
SM18	3.420	3,7	Natalio Loayza	M	45	varias
SM19	2.490	6,5	Cristian Persi	M	6	
SM20	2.070		José Fernando	M	5	
SM21	6.370	1,3	Roxana Zunco	F	26	Lavado

Tabla 5. Resultados Yani año 2014

Descripción	C, ng/g	% RSD	Nombre	Sexo	Edad	Cargo	Contacto con Hg	Consumo pescado	Elementos de protección	Tiempo en la mina	Alcohol	Tabaco
Y1	1.490	8,8	Roberto Cayeta	M	49	Minero	no	no	-	2014	si	no
Y2	1.890	7,6	Teofilo Quispe	M	28	Socio				2008		
Y3	916	7,6	Lucio Tupa	M	27	Socio	si	si	no	2008	si	si
Y4	316	3,4	Abner Gastón	M	4		no	si	-		no	no
Y5	517	1,5	Maria Huanca	F	65	Socio	si	si	no	1984	si	si
Y6	1.760	11,1	Sonia Suca	F	32	Socio	si	si	no	2008	no	no
Y7	885	4,1	Mateo Romero	M	45	Minero	si	si	no	1999	si	no
Y8	5.880	4,3	Mario Rojas	M	50	Minero	si	si	no	1989	si	si
Y9	1.030		Elisabet Ninaquito	F	25	Cocinera	no	si	-	1990	no	no
Y10	1.160	10,2	Claudio Yupanqui	M	30	Socio	si	si	no	2012	si	si
Y11	760	2,4	Perro pequinés	M	7		-	-	-	2007	-	-
Y12	1.400	5,0	Efraín Chinochoque	M	24	Minero	no	si	-	2012	si	si
Y13	2.030	16,5	Abraham Quispe	M	35	Socio						

Y14	6.320	4,8	Fredi Chino	M	48	Minero	si	si	no	2012	si	si
Y15	2.230	13,2	Artemio Chintores	M	20	Minero	no	si	-	2013	si	si
Y16	1.490	10,1	Richard Chino	M	22	Minero	no	si	-	2011	si	si
Y17	7.070	8,7	Sabina Chino	F	4		no	si	-	2012	no	no
Y18	4.260	9,4	Ariel Chino	M	2		no	si	-	2012	no	no
Y19	3.230	9,4	Alcides Chino	M	17	Minero	no	si	-	2014	si	si
Y20	1.520	4,4	Lino Chino	M	39	Minero	si	si	no	1994	si	si
Y21	452	9,2	Pascual Ispecusi	M	52	Minero	si	si	no	2007	si	no
Y22	685	3,8	Gerardo Apasa	M	44	Minero	si	si	no	2007	si	no
Y23	383	15,7	Wilson Leo Tola	M	5		no	si	-	2009	no	no
Y24	1.119	17,9	Luci Hujra	F	22	Platear	si	si	no	2009	si	no
Y25	287	7,8	Llama				-	-	-	-	-	-
Y26	581	101,2	Ruben Tola	M	33	Minero	si	si	no	1999	si	si
Y30	280	19,0	Oveja				-	-	-	-	-	-
Y31	2.920	8,4	Perro mediano	M	4		-	-	-	-	-	-
Y32	519		Felicidad Alvarez	F	35	lav	si	si	no	1979	no	no

Tabla 6. Resultados Ingenio Limitado año 2014

Descripción	C, ng/g	% RSD	Nombre	Sexo	Edad	Cargo	Contacto con Hg	Consumo pescado	Elementos de protección	Tiempo en la mina	Alcohol	Tabaco
IL 1	573		Yola Quispe	F	31	Ama de casa	-	si	-	2007	si	no
IL 2	2.050	3,4	Lorezno Panti	M	40	Directiva	si	-	no	2000	si	si
IL 3	1.750	1,2	Erasmio Julián	M	54	Planta	si	no	no	1993	si	si
IL 4	818	2,2	Francisco Adubiri	M	57	Minero	si	no	no	2008	si	si
IL 5	1.750	5,1	Nora Quispe	F	35	Planta	si	si	no	1998	si	si
IL 6	2.280	5,9	Alejandro Romero	M	34	Planta	si	si	no	2008	no	no
IL 7	765	4,1	Javier Ayala	M	38	Planta	si	no	no	2002	no	no
IL 8	9.520	1,6	Justo Quispe	M	55	Planta	si	si	no	2001	si	no
IL 9	2.780	4,8	María Poma	F	28	Planta	si	si	no	1999	si	si

Tabla 7. Resultados Señor de Mayo año 2015

Descripción	C, ng/g	% RSD	Nombre	Sexo	Edad	Cargo	Contacto con Hg	Consumo pescado
SM2-1	3530	14,6	Guillermo Calisaya	M	50	Presidente de Vigilancia	1 vez por semana	Pocas veces
SM2-2	1710	28,1	Sixto Bonilla Loza	M	60	Base	2 veces por semana. Hace 3 años era diariamente	Pocas veces
SM2-3	1750	12,4	Serafin Rodríguez	Payé M	35	Socio	1 vez por mes	Pocas veces
SM2-4	963	5,8	Gonzalo Mamani	M	35	Base	1 vez por mes	1 vez por semana
SM2-5	703	8,0	Rodolfo Rada	M	45	Base	2 - 3 veces por semana	1 vez por mes
SM2-6	1800	3,3	Antonio Muñoz	M	49	Base	2 veces por semana	1 vez por semana
SM2-7	1760	44,5	Alfonso Tola Quispe	M	67	Vocal vigilancia	3 veces por semana. Hace un año no usaba guantes.	1 vez por semana
SM2-8	4680	19,6	Wilfredo Poma	M	62	Almacenero	Todos los días	Sí de vez en cuando
SM2-9	433	5,3	Johnny Acarapi	M	36	Secretario General	Cada 2 semanas	2 - 3 veces por semana
SM2-10	1890	8,8	Agustin Huaywa	M	33	Base	1 vez por mes	De vez en cuando

SM2-11	1000	10,0	Julio Mamani Ibañez	M	49	Base	2 - 3 veces por mes	Sí cuando va a la ciudad La Paz
SM2-12	17000	6,0	Luisa Romero	F	50	Comerciante	Ninguno	A veces
SM2-12L	18300	1,5						
SM2-13	1490	14,1	Veronica Quispe	F	28	Socia	1 vez por mes	1 - 2 veces por mes
SM2-14	3540	15,8	Dionisia Romero	Quito F	35	Socia - Base	1 - 2 veces por mes	3 - 4 veces por mes
SM2-15	5210	39,9	Max Figueredo	Bonilla M	36	Secretario de Vigilancia	2 - 3 veces por semana	1 vez por semana
SM2-16	10700	4,4	Alberto Lopez	M	38	Jefe de Maquinas	Diariamente	1 vez por mes
SM2-16L	7650	3,0						
SM2-17	22100	26,2	Julian Payo	M	60	Base, Agricultor	Diariamente. El año pasado casi todos los días, este año no tanto	De vez en cuando
SM-17L	19900	1,3						
SM2-18	3760	9,1	Freddy Julio Mayta	M	27	Base	1 vez por mes	Cada 2 semanas
SM2-19	6800	14,0	Rodrigo Mamani	M	26	Soldador	1 vez por mes	2 veces por mes
SM-19L	3660	11,8						

SM2-20	2370	8,2	Felisa Quispe	F	35	Base en el molino	1 vez por mes	A veces
SM2-21	913	18,0	Ronald Corina Apaza	M	4	Comunario	No, pero juega cerca de los molinas	A veces
SM2-22	1020	12,1	Alexander Corina Apaza	M	7	Comunario	No, pero juega cerca de los molinas	A veces
SM2-23	1030	5,2	Joaquin Corina Silva	M	28	Base	Trabaja en la mina	A veces
SM2-24	2530	11,2	Amado Guaygua	M	32	Base	1 vez por mes	3 veces al año
SM2-25	8500	16,4	Perro		7 meses		Toma agua del molino	
SM2-25L	5480	4,0						
SM2-26	6570	2,2	Yoel Gomez	M	1a. y 4m.	Comunario	Ninguno	No
SM2-26L	4100							
SM2-27	7650	12,8	Susana Gomez	F	31	Comunaria, cocinera	No	A veces
SM2-27L	5250							

Tabla 8. Resultados Yani año 2015

Descripción	C, ng/g	% RSD	Nombre	Sexo	Edad	Cargo	Contacto con Hg	Consumo pescado
Y2-1	2240	21,7	Jaime Chavez Mamani	M	25	Minero	Cada 2 meses	1 vez por mes
Y2-2	1900	4,3	Hector Queachino	M	18	Minero	Cada 2 meses	1 vez por semana
Y2-3	1210	4,1	Roger Choque	M	16	Minero	Cada 2 meses	De vez en cuando
Y2-4	706	2,2	Oscar Tupac	M	20	Minero	1 vez al mes	1 vez por mes
Y2-5	6035	48,7	Eliodoro Pantí Paye	M	63	Minero	1 vez por semana	1 vez por mes
Y2-5L	1270	12,1						
Y2-6	3440	11,7	Freddy Chahña	M	29	Mecánico Industrial	Quemado de Hg cada 3 días	1 vez por semana
Y2-7	5360	34,2	Oscar Condori Quispe	M	27	Conductor de volqueta	Ninguno	No
Y2-8	13200	47,4	Hector Loza	M	34	Ayudante soldador, entra al socavon a veces	2 veces a la semana	No mucho
Y2-8L	3710	3,7						
Y2-9	2990	38,0	Mario Rojas Huanca	M	52	Minero, comerciante	1 semana al mes	2 veces al mes
Y2-10	833	21,1	Teófilo Quispe	M	30	Minero, chacra	1 vez al mes	1 vez al mes

Y2-11	1050	5,4	Juan Elias Quispe	M	40	Minero	1 vez al mes	1 vez al mes
Y2-12	1140	9,2	Claudio Yupanqui	M	31	Minero, agricultor	4 veces al mes	3 veces al mes
Y2-13	572	25,8	Abraham Quispe	M	35	Minero	1 vez al mes	2 veces al año
Y2-14	605	38,4	Juan Tola Yujra	M	45	Minero	1 vez al mes	2 veces al mes
Y2-15	511	48,4	Teodoro Romero Alvarez	M	45	Minero	1 vez al mes	3 veces al mes
Y2-16	2440	9,0	Humberto Tola Quispe	M	44	Minero, chacra	1 vez al mes	2 veces al mes
Y2-17	979	33,6	Gregorio Romero	M	42	Minero, agricultor	1 vez al mes	2 veces al mes
Y2-18	1230	18,7	Virgilio Choque	M	38	Minero, chofer	1 vez al mes	3 - 4 veces al mes
Y2-19	993	19,6						
Y2-20	1930	58,2	Eusebio Huasco	M	55	Minero, chofer	1 vez al mes	3 veces al mes
Y2-21	450	16,6	Roberto Choque	M	60	Minero, agricultor	2 veces al mes	1 vez al mes
Y2-22	2260	16,1	Romulo Thomas Apaza	M	68	Minero, Profesor jubilado	2 veces a la semana	3 veces al mes
Y2-23	2280	44,8	Damasu Quispe Alarcon	M	42	Minero	1 vez al mes	2 veces al mes
Y2-24	1150	10,4	Richard Apaza	M	40	Minero	1 vez al mes	1 vez por semana
Y2-25	2690	10,6	José Tola	M	45	Minero, comerciante	Casi diariamente	1 vez por semana